



PIENTUULIVOIMALAN OMINAISUUDET

Sähkönlaatu ja suorituskyky

Antti Järvinen

Opinnäytetyö
Toukokuu 2012
Sähkötekniikka
Sähkövoimatekniikka

TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU
Tampere University of Applied Sciences

TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu
Sähkötekniikka
Sähkövoimatekniikka

ANTTI JÄRVINEN:
Pientuulivoimalan ominaisuudet
Sähkönlaatu ja suorituskky

Opinnäytetyö 55 sivua, josta liitteitä 25 sivua
Toukokuu 2012

Työn tarkoituksena oli tutustua Cypress windturbines Oy:n Tampereen ammattikorkeakoululle toimittaman pientuulivoimalan ominaisuuksiin sekä tuulivoimaan yleisesti.

Työssä olen tutkinut laboratorio mittauksilla laitteiston tuottaman sähkön laatua sekä suorituskkyä.

Laitteiston sähköverkkoon tuottamassa sähkönlaadussa on parannattettavaa. Sähkönlaatu paranee oleellisesti generaattorin pyörimisnopeuden kasvaessa. Laitteiston sähköverkkoon tuottamaa sähkö pitäisi pystyä parantamaan suodatuksien avulla. Varsinkin sähkövirran sisältämien yliaaltojen määrää tulisi saada suodatettua pienemmiksi. Rungas yliaaltojen määrä vaikuttaa sähköverkon mitoituseseen.

ABSTRACT

Tampereen ammattikorkeakoulu
Tampere University of Applied Sciences
Electrical engineering
Electric power engineering

ANTTI JÄRVINEN:
Small windturbines characteristics
Quality of electricity and performance

Bachelor's thesis 55 pages, appendices 25 pages
May 2011

Aim of this work was to explore the features of a small wind turbine provided to Tampere University of Applied Sciences by Cypress windturbines Oy, and the wind power in general.

In my work I have studied in laboratory conditions and tests the quality and performance of the electricity generated by this equipment.

The quality of the electricity produced to the power grid could be improved. Quality of the electricity improves essentially with the increase of generators rotational speed. Filtrations should be able to improve the quality of this electricity. Especially the amount of harmonic waves in the electric current should be reduced by filtration. Extensive amounts of harmonic waves affect the dimensioning of power grid.

Key words: small wind power, quality of electricity, performance

SISÄLLYS

1	JOHDANTO.....	5
2	TUULIVOIMA	6
2.1	Tuulivoima yleisesti.....	6
2.2	Tuulivoiman teoria.....	8
2.3	Suomen tuuli olosuhteet	11
3	TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULUN TUULIVOIMALA	12
3.1	Generaattori.....	12
3.2	Verkkolaitteisto	12
4	SÄHKÖN LAATU	15
4.1	Sähkönlaatu yleisesti.....	15
4.2	Harmoniset yliaallot	16
4.3	Kytkeä sähköverkkoon.....	16
4.4	Tamkin voimalan sähkönlaatu	17
4.4.1	Sähkölaatu eri pyörimisnopeuksilla.....	17
5	SUORITUSKYKY	24
5.1	Yleistä	24
5.2	Pätöteho.....	24
5.3	Loisteho	26
6	POHDINTA.....	29
	LÄHTEET.....	30
	LIITTEET	31
	Liite 1. Sähkönlaatu mittauksen virta kuvaajat.....	31
	Liite 2. Sähkönlaatu mittauksen virran spektri kuvaajat	37
	Liite 2. Sähkönlaatu mittauksen jännite kuvaajat.....	43
	Liite 4. Suorituskyky mittauksen kuvaajat.....	49

1 JOHDANTO

Tuulivoiman kasvu on tällä hetkellä koko maailmassa suurimmillaan. Suomessa pyritään myös kasvattamaan uusiutuvien energiamuotojen käyttämistä energian tuotannossa.

Energian oma tuotanto on kasvanut ja kasvaa huomattavaa vauhtia. Markkinoille tulee joka päivä uusia tuulivoimala malleja ja vanhat mallit myös kehittyvät kokoajan. Tässä työssä olen tutkinut Cypress windturbines Oy:n Tampereen ammattikorkeakoululle toimittamaa 3,5 kW pientuulivoimalan ominaisuuksia, kuten sähkönlaatua ja suorituskykyä.

Työn alussa olen kertonut tuulivoimasta yleistä sekä myös vähän teoriaa.

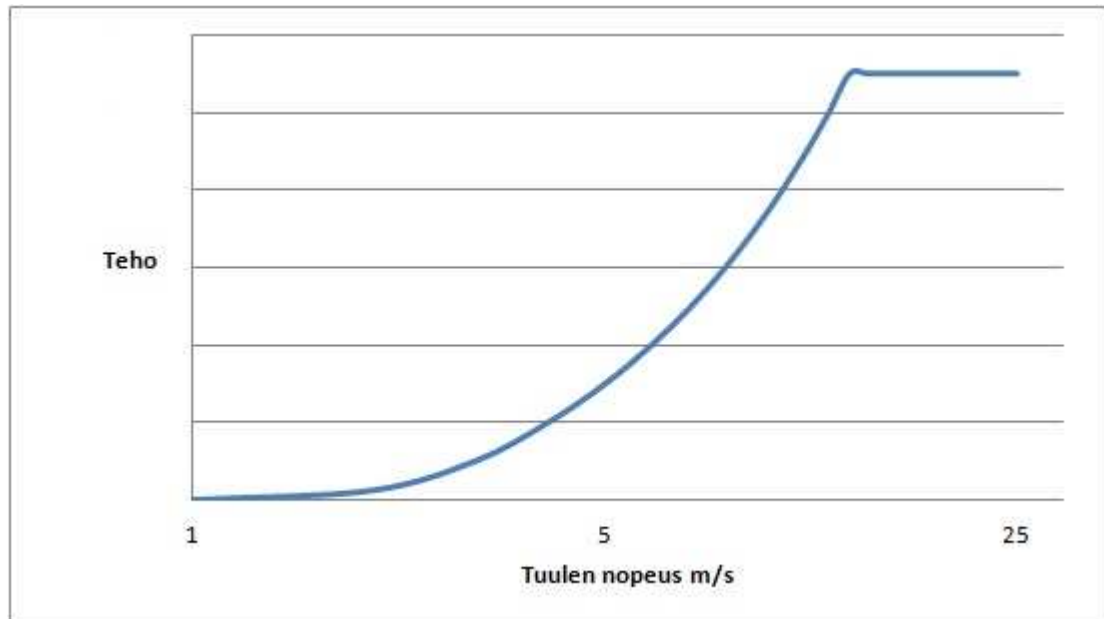
2 TUULIVOIMA

2.1 Tuulivoima yleisesti

Tuulivoima on tuulen eli ilman virtauksen liike-energian muuntamista tuuliturbiineilla sähköksi. Tuulivoima on uusiutuvaa energiaa, joka on peräisin Auringon säteilyenergiasta. Suurimmassa osassa nykyaikaisia tuulivoimaloita pyörivien lapojen liike-energia muutetaan sähkövirraksi. Menetelmä on samankaltainen kuin vanhemmissa tuulimyllyissä, joissa tuulen liike-energiaa käytetään esimerkiksi jyvien jauhamiseksi tai veden pumppaamiseksi maasta. Ainoana erona vanhanajan tuulivoimaloihin on, että nykyaikana voimaloiden lavat on suunniteltu niin, että ne hyödyntävät ilmavirtauksen aiheuttamaa nostetta, kun taas vanhimmat voimalat perustuivat tuulen aiheuttamaan paineeseen lapaa kohtaan. (Tuulivoimayhdistys, 2012)

Tuulivoimalla tuotetaan hieman yli prosentti maailman sähköntuotannosta ja sillä tuotettiin hieman alle 4 % Euroopan sähköstä vuoden 2009 lopussa(EIA). EWEA, Euroopan tuulivoimatuottajien edunvalvontajärjestö ennustaa tuulivoiman tuottavan 13 % Euroopan sähköstä vuonna 2020. Suurimpia tuulivoimaa tuottavia maita ovat Tanska (yli 20 %), Espanja (9 %) ja Saksa (7 %). Tuulivoiman tuotanto on seitsenkertaistunut aikavälillä 2000–2010 ja kasvun odotetaan jatkuvan edelleen hyvin merkittävänä. Tuulivoiman käyttöönottoa voidaan edistää syöttötariffeilla, sertifikaateilla, sujuvilla lupaprosesseilla ja sähköverkkoyhteyksillä.

KUVIO 1. Esimerkki kuvaaja tuulen nopeuden kasvun vaikutuksesta tehoon.



Käynnistyäkseen tuulivoimala tarvitsee vähintään 3 m/s tuulennopeutta. Riippuen voimalamallista, tuulen nopeuden ollessa 13-14 m/s voimala saavuttaa nimellistehonsa. Tästä eteenpäin aina 25 m/s asti voimala tuottaa vakiotehoa. Kuviossa 1 on kuvaajan avulla havainnollistettu tämä. Kuviosta 1 nähdään, tehon kasvu tuulen nopeuteen nähden on eksponentiaalista. Tämä johtuu siitä, että turbiini ei pysty pienillä nopeuksilla hyödyntämään täysin ilmavirtausta, vaan osa ilmavirtauksesta pääsee suoraan läpi. Suuremmilla turbiinin pyörintänopeuksilla, pystyy turbiini hyödyntämään paremmin ilmavirtausta, jolloin turbiinin lavat niin sanotusti leikkaavat tuulta enemmän. Parhaita paikkoja tuulivoimaloille ovat merten rannikot, merialueet, aukeat mereen rajoittuvat pellot tai suurten mäkien ja vuorten rinteet ja laet, joissa tuulen keskinopeus on 5,5–7,5 m/s.

Tuulisuus vaihtelee vuorokauden, vuodenaikojen ja säärintamien mukaan. Keskimääräinen tuulen energia on lähes vakio ja laajalla alueella tuotannon erot tasoittuvat. Talvisin tuulee enemmän kuin kesäisin ja tuulivoiman tuotantoprofiili osuu kuukausitasolla hyvin yhteen kulutuksen kanssa. Alle 20 %:n energiantuotanto-osuudella tuulivoima ei merkittävästi lisää säätövoiman tarvetta.

Vaihtelua tasoitetaan tavallisesti olemassa olevalla vesivoimalla tai lauhdetuotannolla. Jos tuulivoiman osuus nousee 20 %:sta vielä merkittävästi, niin tuulivoimatuotantoa täytyy tasoittaa lisätoimenpiteillä. Näitä ovat sähköverkkoyhteyksien lisääminen naapurimaihin, kulutuksen jousto tai säätökapasiteetin käyttö.

Tuulivoima soveltuu hajautettuun energiantuotantoon. Sähköä voidaan tuottaa myös pientuulivoimaloilla itse kulutuspaikoilla: maataloilla, taloyhtiöissä, omakotitaloissa ja kesämökeillä. Sähköä voi tuottaa omavaraisesti tai myös valtakunnanverkkoon. Tuulivoimaa käytetään pienimuotoisesti esimerkiksi merkkivaloihin, havaintoasemiin ja viestiasemien radioiden akkujen lataamiseen ja aurinkovoiman täydennyksenä.

Tuulivoiman työllistävyys ja kustannukset ovat merkittävimmät rakennusvaiheessa. Tuulivoimalla ei ole merkittäviä käytönaikaisia raaka-ainekustannuksia ja ylläpitokustannukset ovat pienet. Euroopan komission teettämän selvityksen mukaan tuulivoiman ulkoiset kustannukset, eli yhteiskunnalle ja ympäristölle aiheutetut ylimääräiset kustannukset, ovat eri energiamuodoista halvimmat, 0,1–0,2 senttiä/kWh. (Tuulivoima yhdistys, 2012)

2.2 Tuulivoiman teoria

Tässä osassa olen esittänyt tuulienergiaan liittyviä peruskaavoja, joilla voidaan esimerkiksi määrittää tuuleen varastoituneen energian määrä.

Tuulen kineettisen energian voi laskea seuraavan yhtälön avulla.

$$E = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (1)$$

Jossa E on energia [J]
 m on tuulenmassa
 v on tuulen nopeus

$$m = \rho \cdot A \cdot v \quad (2)$$

Jossa m on tuulen massa [kg]
 ρ on ilman tiheys [kg/m³]
 A on pinta-ala johon tuuli vaikuttaa [m²]
 v on tuulen nopeus [m/s]

Kun yhtälö yksi muokataan yhtälön kaksi avulla saadaan energian yhtälö seuraavaan muotoon.

$$E = P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^2 \cdot v = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (3)$$

Kuten yhtälöstä kolme nähdään, on kineettisen energian yhtälö sama, kuin tuulen turbiiniin siirtämän tehon yhtälö.

Tuulen nopeuden vaikutus turbiinin tehoon on myös huomattava. Jos tuulen nopeus kasvaa 1%:n niin turbiinin teho kasvaa 3%:iin. Tämän voi päätellä yhtälön neljä avulla.

$$\frac{\Delta P}{P} = 3 \cdot \frac{\Delta v}{v} \quad (4)$$

Jossa ΔP on tehon muutos
 P on teho
 Δv on tuulen nopeuden muutos
 v on tuulen nopeus

Jos tuulen nopeus kasvaa 20 %, turbiinin teho kasvaa seuraavasti.

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{v_1^3}{v_2^3} = (1,2)^3 = 1,728 \quad (4)$$

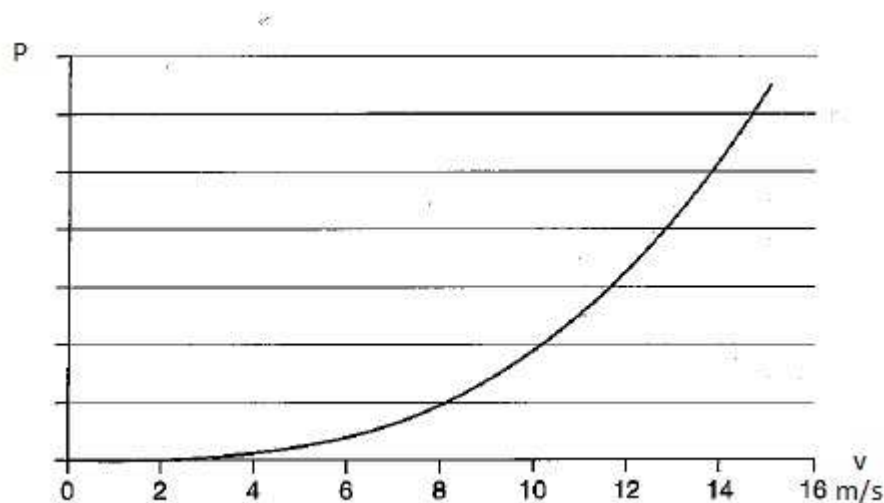
Eli, kun tuulen nopeus kasvaa 20%, niin turbiinin teho kasvaakin 72,8% eli näin ollen tehon kasvun ja tuulen nopeuden kasvun suhde kasvaa, kun tuulen nopeus kasvaa riittävästi.

Myös turbiinin koko vaikuttaa huomattavasti turbiinin tehoon. Esimerkiksi, kun turbiinin sädettä kasvatetaan 1% niin turbiinin teho kasvaa 2%. Tämä voidaan myös todeta yhtälön viisi avulla. Suuremmilla muutoksilla tämä ei enää tosin päde. Kun sädettä kasvatetaan 10% niin teho kasvaa 21% ja taas 20% säteen kasvatus lisää tehoa 44%.

$$\frac{\Delta P}{P} = 2 \cdot \frac{\Delta r}{r} \quad (5)$$

jossa ΔP on tehon muutos
 P on teho
 Δr on turbiinin säteen muutos
 r on turbiinin säde

Kuvio 2: Tuulen nopeuden vaikutus turbiinin tehoon.(Pramod Jain, Wind energy engineering)



Kuten jo aikasemmin on mainittu, niin tuulivoimala tarvitsee 3 m/s tuulta, ennen kuin sen on mahdollista lähteä pyörimään. Tämä voidaan myös nähdä kuvion yksimukaisesta taulukosta, jossa nähdään turbiinin tehon huomattava kasvu kun tuulennopeus ylittää tuon mainitun 3 m/s.

2.3 Suomen tuuli olosuhteet

Tuulivoimalan kannalta voidaan todeta, että Suomessa tuulee eniten talvikuukausina ja selvästi vähemmän kesäkuukausina. Suomen tuulioloihin vaikuttaa merkittävästi maantieteellinen sijaintimme ja pääasiassa Atlantilta maahamme suuntautuvat matalapaineet ja niiden kulkemat reitit. Näistä johtuen suuren mittakaavan keskimääräinen tuulen nopeus noin kilometrin korkeudessa (geostrofinen tuuli) on verraten suuri (9-9,5 m/s), eli huomattavasti suurempi kuin eteläisemmässä Euroopassa (7-8,5), mutta toisaalta pienempi kuin lähempänä pohjoista Atlanttia sijaitsevilla Brittein saarilla (10-12 m/s), Norjan rannikolla (10-11 m/s) tai Tanskassa (10-10,5 m/s) ja Pohjanmeren rannikolla (10-10,5 m/s). (Tuuliatlas)

Vuoden 2010 lopussa Suomessa oli 130 tuulivoimalaa. Niiden yhteenlaskettu teho on 197 MW ja ne tuottavat noin 0,3% Suomessa kulutetusta sähköstä. (Motiva)

3 TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULUN TUULIVOIMALA

Tampereen ammattikorkeakoululle asennettiin vaaka-akselin tuulivoimala vuonna 2011. Voimalan laitteiston toimitti Cypress Wind Turbines Oy, joka on valmistanut voimalan verkkoonkytkentälaitteiston. Turbiinin on valmistanut Windspot Oy, joka käyttää turbiinissaan kiinalaisen Sankoyin valmistamaa generaattoria, voimalat valmistetaan Espanjassa. Tamk:n voimalan koko on 3,5kW, joka riittäisi hyvin esimerkiksi omakotitalon sähköntuotantoon tai pienen maatilan sähköntuotantoon. Sähkövoimatekniikan laboratorioon hankittiin samalla vastaavanlainen laitteisto laboratoriotoiminnan tarpeisiin. Tällä laboratorio laitteistolla on suoritettu työhön liittyvät mittaustoimenpiteet.

3.1 Generaattori

Generaattori on kestopagnetoitu generaattori, jonka nimellisarvot ovat seuraavat .

TAULUKKO 1: Generaattorin nimellisarvot

3 vaiheinen kestopagnetoitu generaattori			
3,5kW			
42 Hz	252 rpm	320 VAC	7A

3.2 Verkkolaitteisto

Verkkolaitteisto toimii kahdella Vaconin taajuusmuuttajalla, jotka on kytketty toisiinsa tasajännitevälipiirin välityksellä. Toinen taajuusmuuttaja muuttaa generaattorilta saadun vaihtojännitteen tasajännitteeksi ja toinen taajuusmuuttaja muuttaa taas tasajännitteen verkkoon sopivaksi 400V 50Hz jännitteeksi. Kuvassa 1 on esitetty verkkolaitteiston komponentit.

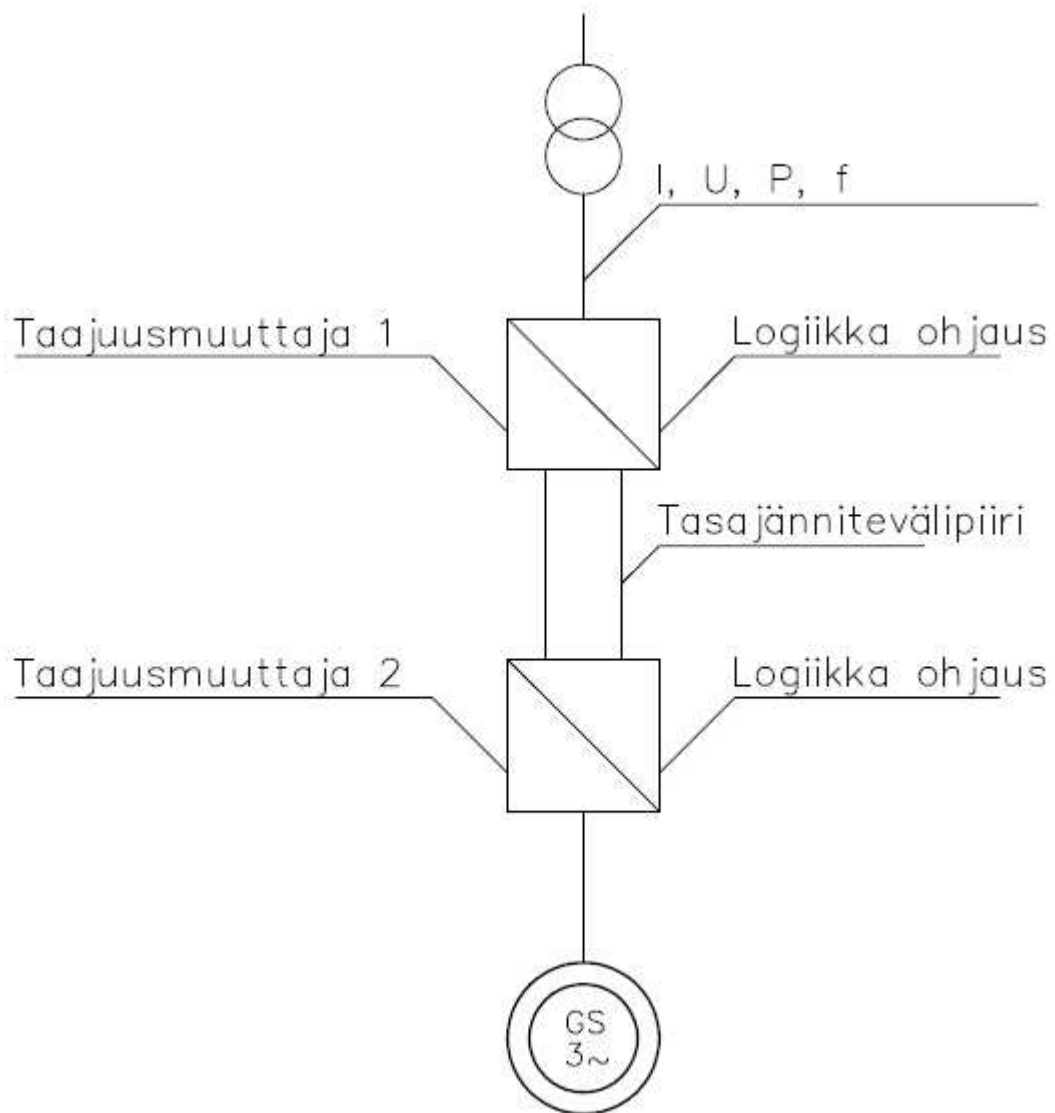


KUVIO 3. Taajuusmuuttaja laitteisto.

Kuvassa 1 on esitetty taajuusmuuttajalaitteiston komponentit

1. Easyrele
2. Generaattori puolen taajuusmuuttaja
3. Verkkopuolen taajuusmuuttaja
4. L – suodatin
5. LC – suodatin
6. Generaattorin taajuusmittain
7. Suojarele

Verkkolaitteiston toimii seuraavasti. Taajuusmittain mittaa generaattorin taajuuden. Tieto taajuudesta kulkee Easy -releelle, johon on aseteltu tiedot, missä vaiheessa taajuusmuuttajat käynnistetään. Easy -rele on aseteltu niin, että taajuusmuuttajien käynnistyessä, generaattorin tuottama sähköteho ylittää taajuusmuuttajien ottaman tehon. Jolloin laitteiston kuluttama sähkö jäisi mahdollisimman pieneksi. Kun tuuli laantuu ja generaattorin sähköntuotto lakkaa, jää laitteisto noin 5 minuutin ajaksi valmiustilaan, jonka jälkeen siirtyy niin sanottuun horrostilaan, jolloin sähkönkulutus on hyvin pientä.



KUVIO 4. Periaatteellinen kytkentä kuva

Kuviossa 4 on esitetty voimala laitteiston periaatteellinen kytkentä kuva. Kuvaan on merkitty mittauspiste yksikkötunnuksilla (I, U, P, f). Työn kaikki mittaukset on suoritettu sähköverkonpuolelta.

4 SÄHKÖN LAATU

4.1 Sähkönlaatu yleisesti

Standardi SFS-EN 50160 määrittelee jakelujännitteeltä vaadittavat ominaisuudet pien- ja keskijänniteverkon normaaleissa käyttötilanteissa. Standardin asettamia ehtoja jännitteen laadulle ei tule kuitenkaan käyttää sellaisenaan pienvoimaloiden tapauksessa, vaan nykyaikaisilla laitteistoilla tulee pyrkiä parempaan jännitteen laatutasoon. (Sener 2001)

Jakeluverkkoon liitettävät tuotantolaitteistot lisäävät verkossa tapahtuvia muutosilmiöitä. Ilmiöt ovat sitä voimakkaampia, mitä suurempi verkkoon liitetyn tuotannon yhteenlaskettu nimellisteho on, suhteessa verkon oikosulkutehoon. Jännitevaihtelut eivät saa olla liian suuria kytkettäessä tai erotettaessa pienvoimalaverkosta. Lisäksi jännitetason on pysyttävä standardin osoittamissa rajoissa eikä nopeita jännitteen muutoksia saa esiintyä liikaa. (Sener 2001)

Tehoelektroniikan välityksellä verkkoon liitetty tuotantolaitokset synnyttävät verkkoon harmonisia yliaaltoja, ja aiheuttavat näin ollen jännitteen säröytymistä. Standardi EN-50160 määrittelee raja-arvot viikon tarkastelujaksolla yksittäisten harmonisten yliaaltojännitteiden 10 minuutin tehollisarvoille, lisäksi raja-arvo annetaan harmoniselle kokonaissärölle. Standardin määrittämät rajat ovat kuitenkin sellaiset, että niitä lähestyttäessä alkaa verkossa käytännössä esiintyä ongelmia. Verkonhaltijan tulisiikin asettaa yliaalloille standardia tiukemmat raja-arvot.

(Sener 2001)

4.2 Harmoniset yliaallot

Tehoelektroniikalla toimivat laitteistot tuottavat usein verkkoon harmonisia yliaaltoja. Näistä yliaalloista pahimpia ovat kolmella jaolliset harmoniset yliaallot, pahimpana kolmas yliaalto. Nämä yliaallot eivät kumoudu nollajohtimessa vaan vaan summautuvat niissä. Tämä saattaa aiheuttaa nollajohtimeen vaihejohtimia käyttötaajudella suurempaa virtaa. Tällaisissa tapauksissa nollajohtimen virralla voi olla huomattava vaikutus piirin kaapelien mitoitukseen. (SFS 6000, s.282)

Yliaallot jaetaan eri komponentteihin ominaisuuksiensa (järjestysnumeron) perusteella. Komponenttiluokasta nähdään yliaallon vaiheosoittimen pyörimissuunta perustaajuuteen nähden. Yliaallot jaetaan positiiviseen-, negatiiviseen-, ja nollakomponentteihin. Komponenttijako selviää ao. taulukosta. (Leena Korpinen, yliaalto-opus)

TAULUKKO 2. Yliaaltojen komponenttitaulukko (Leena korpinen, yliaalto-opus)

No.	perus	2	3	4	5	6	7	8	9
Taajuus	50	100	150	200	250	300	350	400	450
Komp.	+	-	0	+	-	0	+	-	0

4.3 Kytkeä sähköverkkoon

Kytettäessä pientuulivoimalaa verkkoon, pitäisi varmistua siitä, että laitteisto täyttää kaikki sähköverkon haltijan vaatimat standardit. Laitteiston tuottama jännitteen vaihtelu ei saisi ylittää standardissa määriteltyjä arvoja. Laitteiston tuottama sähkövirta ei saisi sisältää liikaa harmonisia yliaaltoja.

Tilanteissa joissa sähköverkko, jota laitteisto syöttää joutuu vikatilaan ja jännite katoaa, pitäisi laitteen pystyä katkaisemaan oma sähköntuotantonsa. Tällaisissa tilanteissa laitteisto ei koskaan saisi jäädä syöttämään saarekekäyttöä. Tämä voidaan toteuttaa LoM -suojauksella, jonka tulisi katkaista laitteiston sähkönsyöttö 0,15 sekunnissa. (Lehto, 2009)

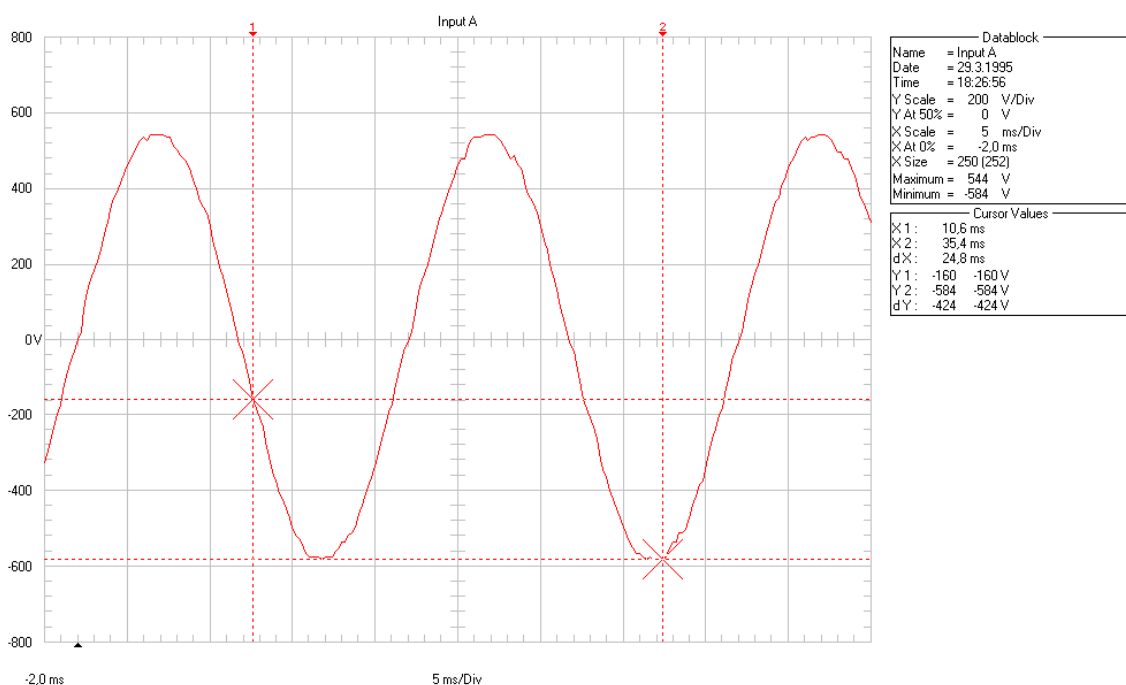
Tämä suojaus löytyy tamk:in laitteistosta.

Tamk:in laitteisto ei pysty tuohon 0,15 sekunnin katkaisuaikaan, vaan katkaisee ajan 0,2 sekunnissa.

4.4 Tamkin voimalan sähkönlaatu

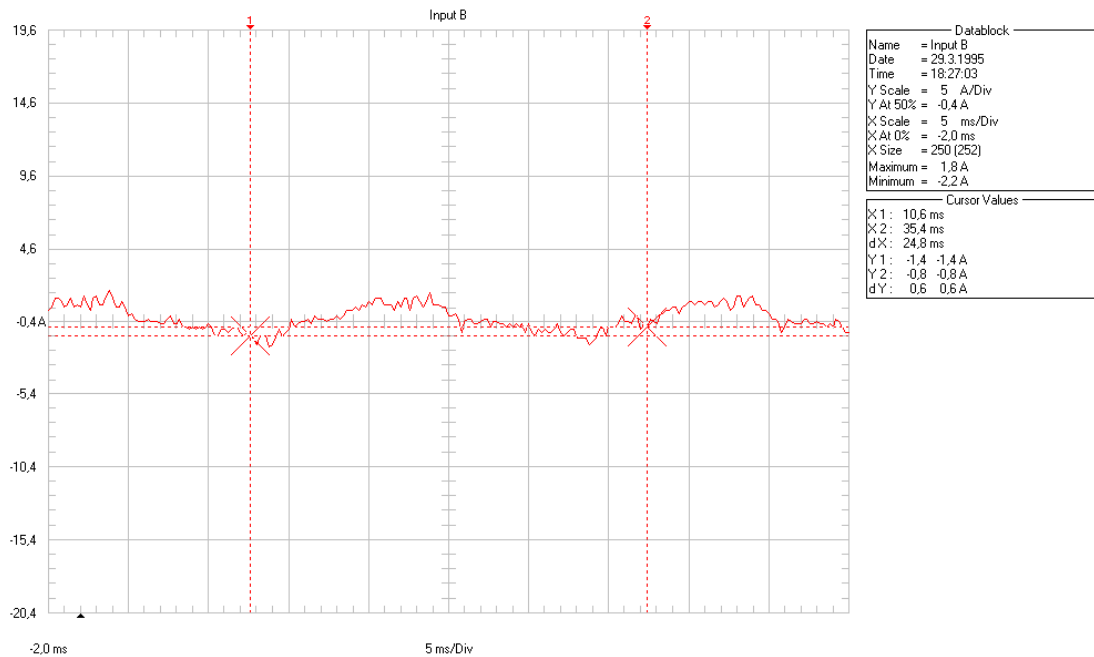
Seuraavissa mittauksissa on esitetty Tampereen ammattikorkeakoulun tuulivoimalan sähkönlaatua eri pyörimisnopeuksilla. Kuviossa on esitetty sähköverkkoon syötettävän sähkönlaatua.

4.4.1 Sähkölaatu eri pyörimisnopeuksilla



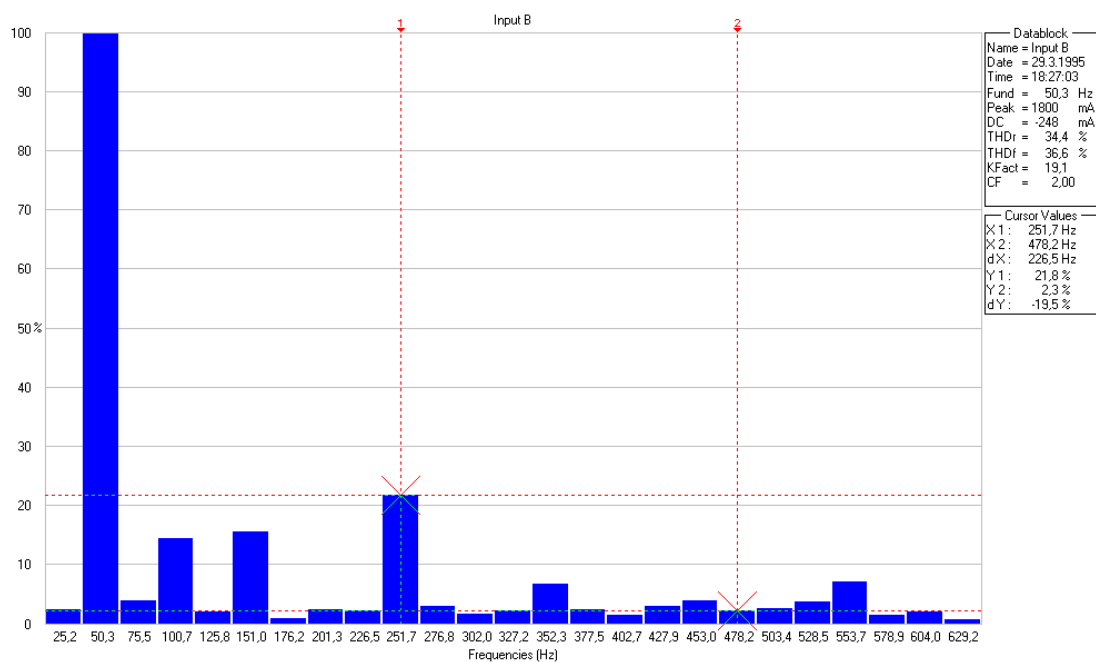
KUVIO 4. Sähkövekkoon syötetyn kahden vaiheen välisen jännitteen kuvaaja 100 rpm pyörimisnopeudella.

Kuviossa 4 nähdään voimalan tuottaman sähkön jännitteen kuvaaja. Jännitteen laatu on pienissä pyörimisnopeuksissa melko hyvää. Kuvassa voidaan pientä säröytymistä nähdä siniaallon huippupisteissä. Pääasiallisesti jännitteen kuvaaja noudattelee hyvin siniaallon muotoa.



KUVIO 5. Sähköverkkoon syötetyn sähkövirran yhden vaiheen virrankuvaaja 100 rpm pyörimisnopeudella.

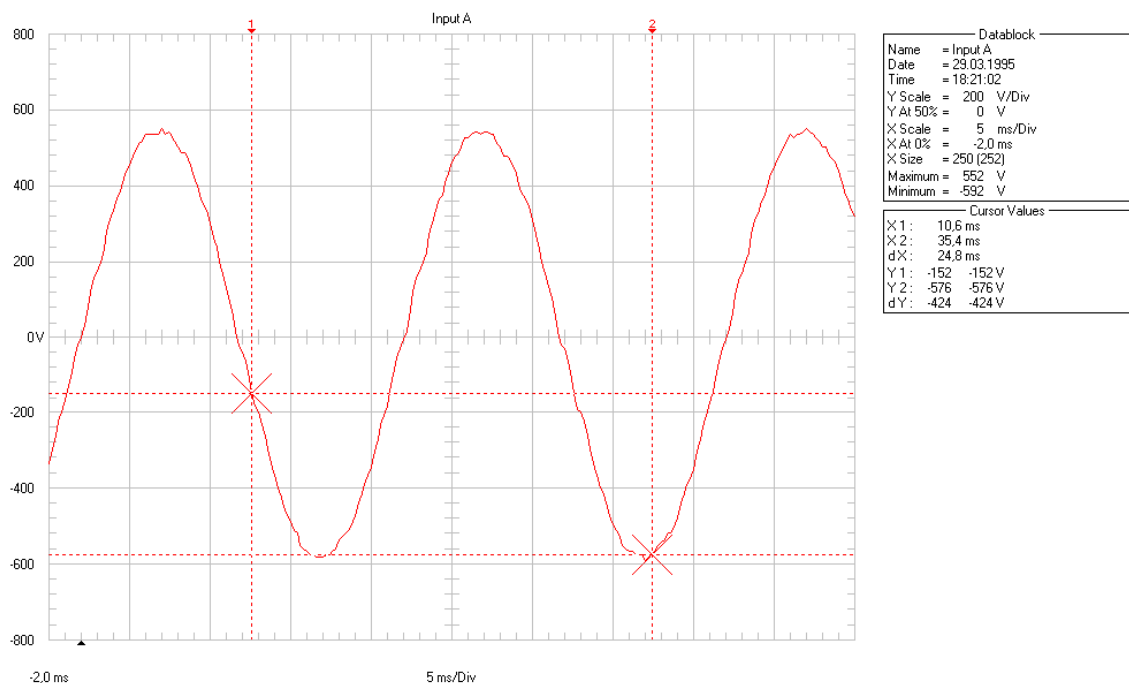
Kuten kuviosta 5 voidaan nähdä, sähkövirran kuvaajan muoto on hyvin säröinen. Pienillä pyörimisnopeuksilla laitteiston tuottaman sähkön laatu kärsii huomattavan paljon. Laatuun saattaa myös vaikuttaa, että laitteiston tuottama sähkövirta ei näin pienellä pyörimisnopeudella ole vielä parhaimmillaan. Tulevissa kuvioissa esitetään virran muotokuvaajia suuremmilla nopeuksilla.



KUVIO 6. Sähköverkkoon syötetyn sähkövirran spektri kuvaaja 100rpm pyörimisnopeudella.

Kuviossa 6 olevassa spektrikuvaajassa nähdään virran sisältämä taajuudet. korkein palkki vasemmalla on niin sanottu perustaajuus eli 50 Hz. Muut palkit ovat niin kutsuttuja harmonisia yliaaltoja.

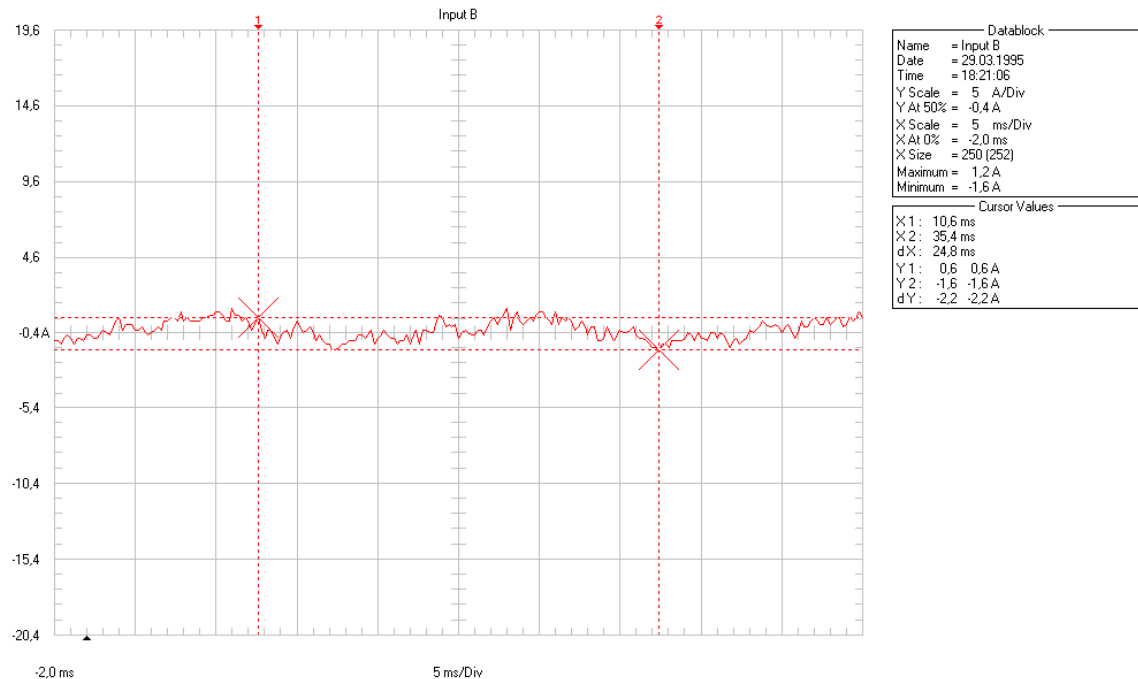
Kuten kuviosta 6 nähdään, sisältää laitteiston verkkoon tuottama sähkövirta huomattavan paljon harmonisia yliaaltoja. Yliaaltoja pystytään suodattamaan kondensaattoreilla ja keloilla. Tässäkin voimalla ratkaisusta löytyy L – suodatin sekä LC – suodatin ja ne ovat mitoitettu todennäköisesti lähelle nimellistä pyörimisnopeutta.



KUVIO 7. Sähköverkkoon syötetyn kahden vaiheen välisen jännitteen kuvaaja 150 rpm pyörimisnopeudella.

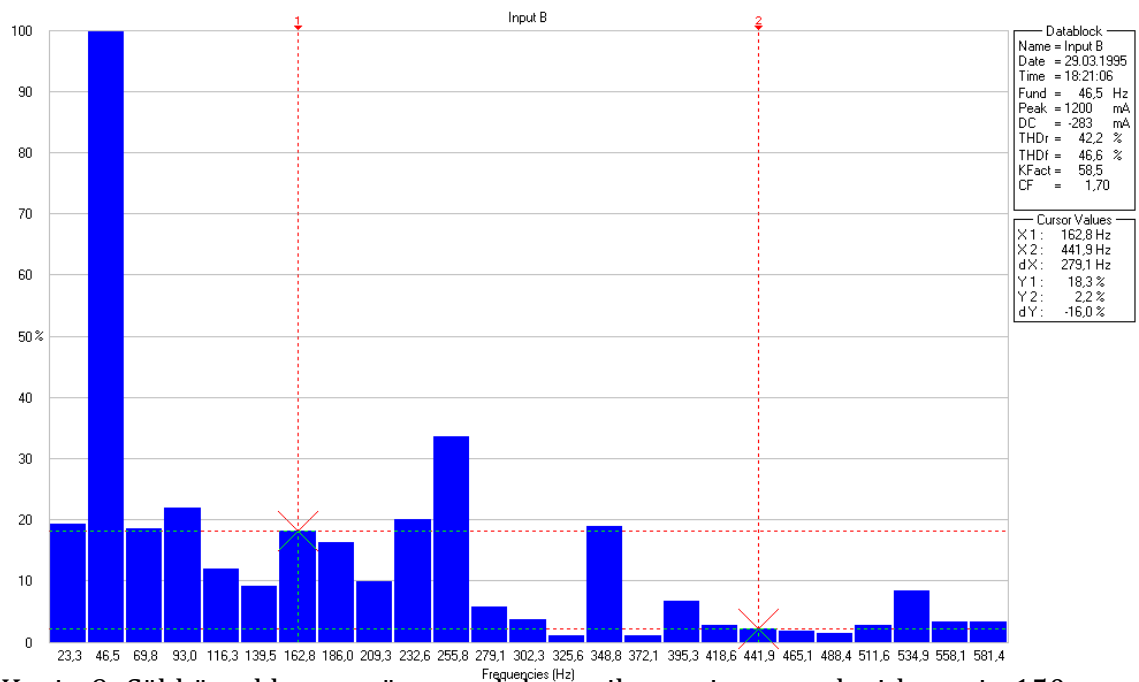
150 rpm pyörimisnopeudella nähdään, että generaattorin pyörimisnopeus ei pahemmin vaikuta laitteiston tuottaman sähköjännitteen laatuun. Jännitteen laatu on kaikilla pyörimisnopeuksilla yhtäläistä, joten niihin ei tässä työssä kiinnitetä enempää huomiota.

Jännitteen taso vaihtelee kyllä huomattavan paljon. 400 V jännitteellä jännitteen huippuarvon pitäisi olla noin 565 V. Kuten kuviosta 5 nähdään huippuarvo vaihtelee välillä 552-592 V. Tämä aiheuttaa jännitteen tehollisarvossa vaihtelun välillä 390-418V. Prosentuaalisesti tämä arvo on $\pm 2,5-4,5$ %. Standardissa sallitaan jännitteen vaihteluksi hyvälle laadulle maksimissaan ± 4 % vaihtelu.(ABB TTT-käsikirja)



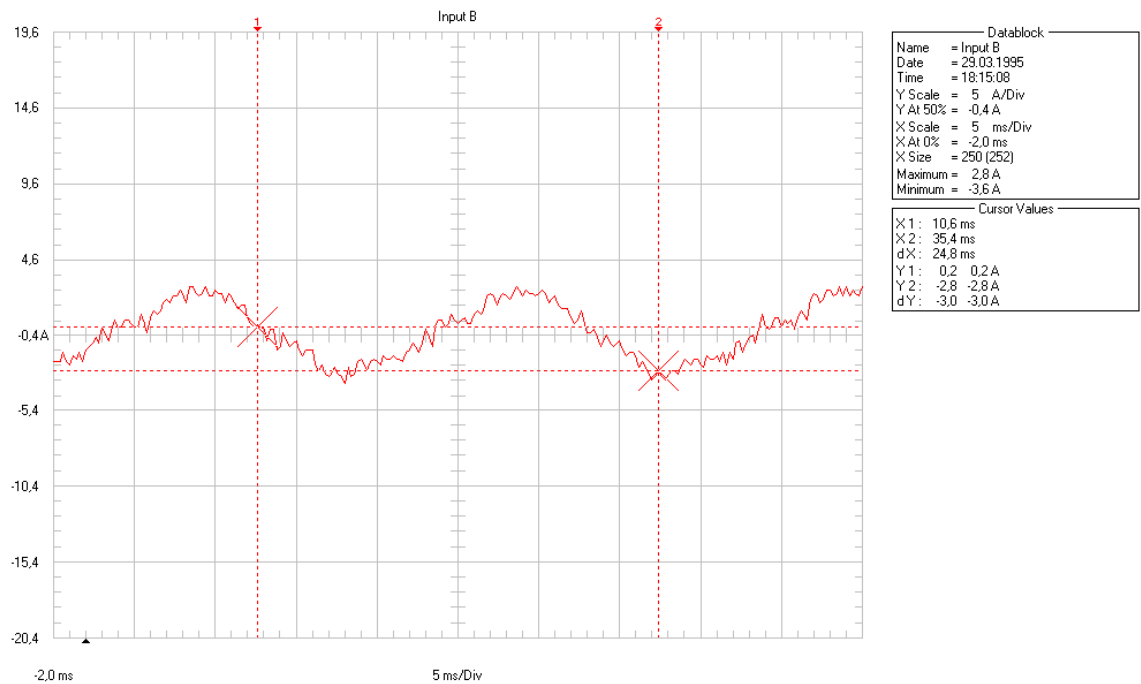
KUVIO 8. Sähköverkkoon syötetyn sähkövirran yhden vaiheen virran kuvaaja 150 rpm pyörimisnopeudella.

Kuten yllä olevasta kuviosta voidaan nähdä, on virran aaltomuoto edelleen hyvin säröinen.



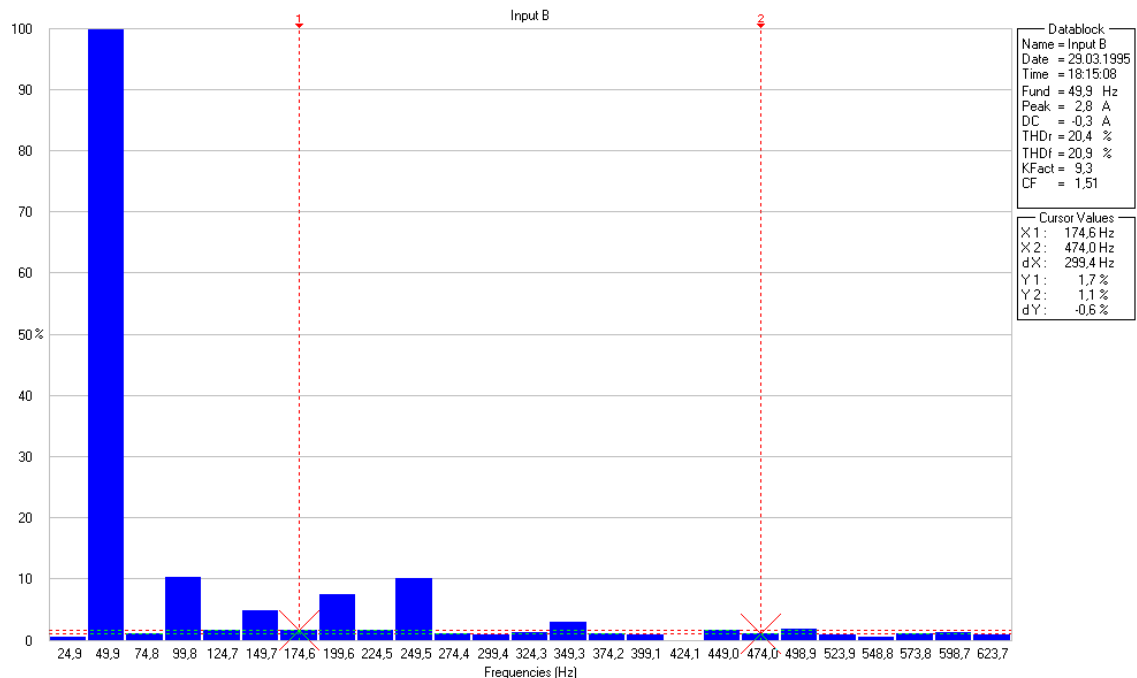
Kuvio 9. Sähköverkkoon syötetyn yhden vaiheen virran spektri kuvaaja 150 rpm pyörimisnopeudella.

Kuten voidaan nähdä, on harmonisten yliaaltojen määrä kasvanut, kun generaattorin pyörimisnopeus on kasvanut 100 kierroksesta minuutissa 150 kierrokseen minuutissa. Kuviosta nähdään myös perusaalloon eli 50 Hz taajuuden vaihtelevuuden. Laitteiston verkkoon syöttämän virran taajuus vaihtelee välillä 46 Hz-53 Hz. Taajuuden vaihtelu johtuu laitteiston tuottaman sähkön jännitteen vaihtelusta.



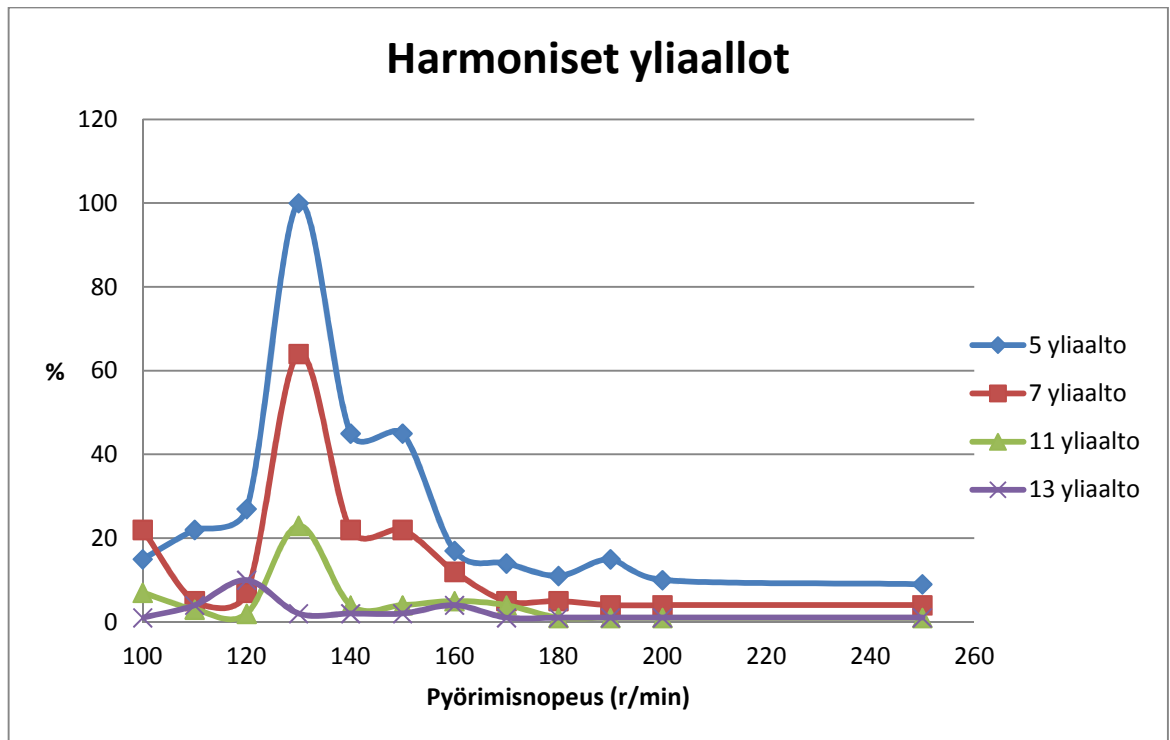
KUVIO 10. Virran Sähköverkkoon syötetyn sähkövirran yhden vaiheen virran kuvaaja 200 rpm pyörimisnopeudella.

Generaattorin pyöriessä lähes nimellisellä nopeudella, voidaan virran kuvaajasta havaita, että se alkaa muistuttamaan hyvin paljon siniaaltoja. Mutta edelleen virran aaltomuoto on hyvin säröinen.



KUVIO 11. Sähköverkkoon syötetyn yhden vaiheen virran spektri kuvaaja 200 rpm pyörimisnopeudella.

Kuvioista 11 voidaan havaita, että generaattorin pyöriessä lähes nimellisellä pyörimisnopeudella, voimalan tuottama sähkövirta sisältää huomattavasti vähemmän harmonisia yliaaltoja kuin hitaammilla nopeuksilla.



KUVIO 12. Tärkeimpien yliaaltojen määrät eri pyörimisnopeuksilla.

Sähköverkon kannalta pahimmat yliaallot ovat viides, seitsemäs, yhdestoista sekä kolmastoista. Tämä siksi, että nämä yliaallot eivät kumoudu pois vaan summautuvat nollajohtimeen ja aiheuttavat näin nollajohtimeen suuremman virran kuin vaihejohtimiin, joilloin nollajohtimen koko joudutaan suurentamaan, jos näitä yliaaltoja ei saada suodatettua pois.

Kuviossa 12 on esitettyä kuvajaa johon on otettu jokaisesta mittauksesta tärkeimmät yliaalto kerrannaiset. Kuviossa noin 130 kierrosnopeudessa on todella paljon yliaaltoja. Nämä suuret määrät pitäisi saada ehdottomasti suodatettua pois. Laitteiston sähköverkkoon tuottama sähkövirta sisältää kuviossa 12 nähtäviä yliaaltoja noin 5-25 % välillä.

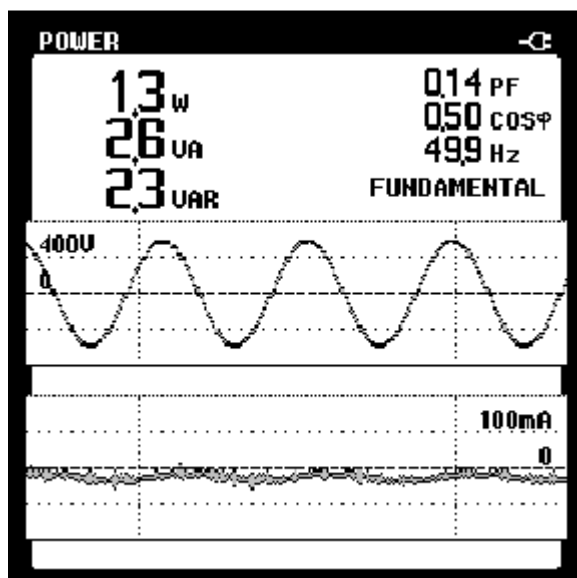
5 SUORITUSKYKY

5.1 Yleistä

Kun mitoitetaan tuulivoimalaa, on otettava huomioon kiinteistön johon sähköä tuotetaan huipputeho. Tämä siksi, että on tuulivoimalan teknillistaloudellinen mitoittaminen on silloin kohdallaan, kun voimala pystyy tuottamaan saman verran tehoa kuin kiinteistö tarvitsee. Tampereen ammattikorkeakoulun voimalaa ei ole mitoitettu kiinteistö sähkönsä tarpeen mukaan, vaan laitteisto on hankittu opiskelijoita varten jotta pystytään tarjoamaan opiskelijoille mahdollisuus tutustua tulevaisuuden uusiutuvien energia muotojen saloihin.

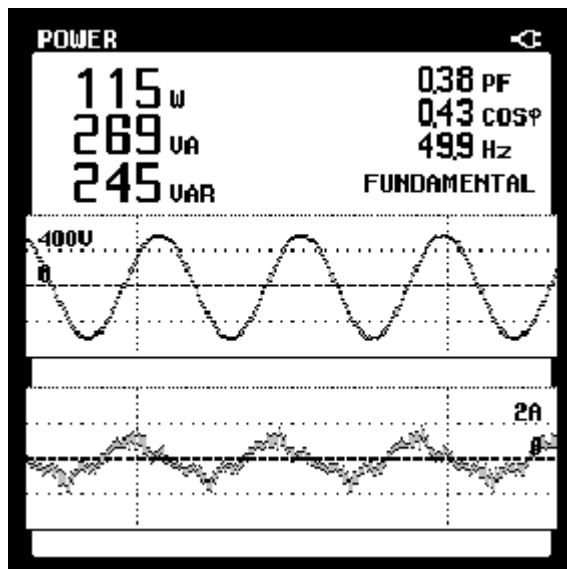
5.2 Pätöteho

Tässä osiossa on esitetty suorituskykymittausten tulokset. mittaukset on suoritettu tasaisilla pyörimisnopeuden muutoksilla 100 – 250 kierrostaminuutissa välillä.



Kuvio 12. Laitteiston sähköverkosta ottama teho, kun laite on horrostilassa.

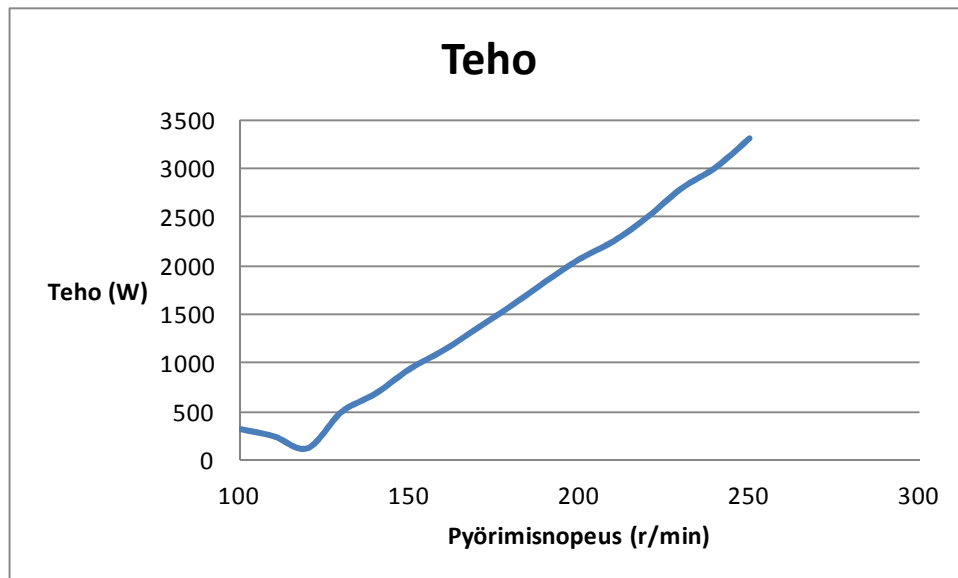
Kuviossa 12 on esitettyä taajuusmuuttajalaitteiston ottama teho, kun laite on horrostilassa odottamassa tuulen yltymistä. Kuten nähdään, laitteiston ottama teho on hyvin pieni ja ei näin kasvata suuresti yleistä sähkönsä kulutusta vaikka ei tuulisikaan.



Kuvio 13. Laitteiston sähköverkosta ottama teho valmiustilassa

Kuten kuviosta 13 nähdään on taajuusmuuttajalaitteiston valmiustilassa ottama teho huomattavasti horrostillaa suurempi. Tämän tehon laitteisto ottaa noin 5 minuutin ajan, kun tuuli lakkaa ja generaattori ei enää pysty tuottamaan sähköä. Laitteiston siirtyessä horrostillasta valmiustilaan, pitäisi generaattorin tuottama sähköteho olla riittävän suuri ylittämään valmiustilassa otettavan sähkötehon. Tämä ei kuitenkaan täysin toteudu taajuusmuuttajan tämän hetkisillä asetuksilla.

Kuvioissa 12 ja 13 esitetyt tehot ovat yhden vaiheen tehoja, eli nämä pitää kertoa kolmella, jotta saadaan kolmivaiheinen teho. Horrostillassa (kuvio 10) kolmivaiheinen teho on 3,9 W ja valmiustilassa (kuvio 11) samainen teho on 345 W.

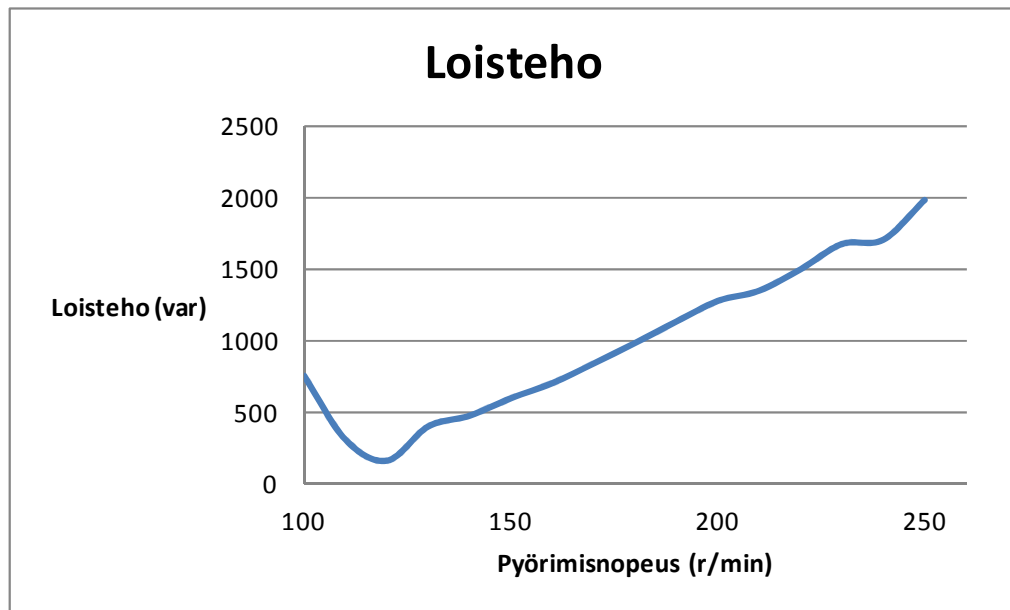


KUVIO 14. Voimalan tuottama teho pyörimisnopeuden suhteena.

Kuviossa 14 on esitettyä kuvaaja, joka osoittaa voimalan tuottaman tehon generaattorin pyörimisnopeuteen nähden. Kuten nähdään teho kasvaa lineaarisesti pyörimisnopeuden kasvaessa. Kuvaajan alussa nähtävä kuoppa, johtuu taajuusmuuttajiin asetetusta momenttikäyrästä. Tätä momentti käyrää pystytään taajuusmuuttajasta muuttamaan portaattomasti. Tehon kasvu ei todellisuudessa ole noin lineaarista, vaan enemmänkin eksponentiaalista.

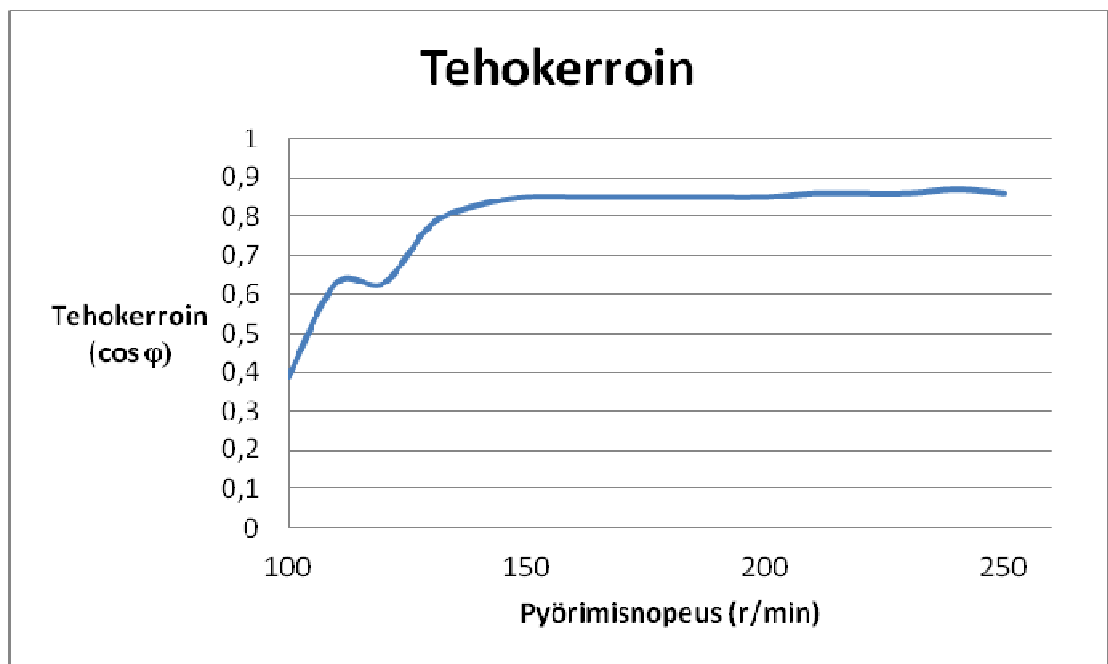
5.3 Loisteho

Laitteiston tuottama sähköteho sisältää huomattavan paljon loistehoa, kuten kuviosta 15 nähdään kasvaa loisteho myös lineaarisesti pyörimisnopeuden suhteena.



KUVIO 15. Laitteiston verkkoon syöttämä kolmivaiheinen loisteho pyörimisnopeuden suhteena.

Kuten myös kuviossa 15 noin 110 rpn:n kohdalla tapahtuva notkahdus johtuu taajuusmuuttajaan asetetusta momenttikäyrästä.



KUVIO 16. Laitteiston verkkoon syöttämän tehon tehokerroin

Kuviossa 16 on esitettyä laitteiston verkkoon syöttämän tehon tehokerroin generaattorin pyörimisnopeuden funktiona. Kuten kuviosta nähdään, on tehokertoimen arvo huono pienillä pyörimisnopeuksilla, mutta nousee nopeasti maksimiinsa eli 0,85. Tehokerroin sisältää yliaallot. Yliaaltojen suodattamisella voitaisiin saada tehokerrointa myös paremmaksi.

6 POHDINTA

Tuulivoimaloiden määrä kasvaa Suomessa huimaa vauhtia. Kuten jo alussa mainitsin erilaisia laitteita tulee markkinoille hyvin kiivaalla tahdilla. Suomessakin tuulivoimaan panostaa huomattavan suuri määrä erilaisia yrityksiä, joidenkin tuotteet ovat hyviä ja joidenkin vähän heikompia.

Kuten mittauksista nähdään Cypressin toimittaman laitteiston sähkönlaadussa on parannettavaa. Laitteiston tuottama sähkön laatu on parhaimmillaan pyöriessään nimellisellä nopeudella. Sähkönlaatu heikkenee huomattavasti pyörimisnopeuden laskiessa. Alemmilla pyörimisnopeuksilla sähkövirta sisältää huomattavan määrän harmonisia yliaaltoja. Laatu voitaisiin parantaa suodatuksen parantamisella. Mielestäni sähkönlaatua pitäisi saada parannettua alemmilla ja keskialueen pyörimisnopeuksilla. Tämä siksi, että hyvin todennäköisesti voimala ei pyöri enintä aikaa täydellä teholla, vaan pyörimisnopeus vaihtelee noin 0 – 60 % välillä.

Laitteiston verkkoon syöttämän sähkön taajuus vaihtelee huolestuttavan paljon. Voimalan taajuus vaihtelee 46,5Hz ja 53,2Hz välillä, enimmäkseen kuitenkin pitää taajuuden hyvin lähellä 50Hz. Prosentuaalisesti taajuus vaihtelee $\pm 6 - 8 \%$. Normaali laatu sallii taajuudelle 1% vaihtelun, joten tästä jäädyään jonkinverran.(ABB TTT-käsikirja)

Laitteiston sähköverkkoon siirtämä teho kasvaa hyvin jyrkästi pyörimisnopeuden kasvaessa. Tehon kasvu on riippuvainen taajuusmuuttajaan asetetusta kuormituskäyrästä. Kuormitusta pystytään säätämään portaattomasti taajuusmuuttajista.

Työ pientuulivoimalan parissa oli mielenkiintoinen ja antoi tulevaisuutta ajatellen perspektiiviä tuulivoimaa kohtaan.

LÄHTEET

Suomen Tuulivoima yhdistys, <http://www.tuulivoimayhdistys.fi/>, luettu 16.3.2012

Suomen tuuliatlas <http://www.tuuliatlas.fi/tuulisuus/index.html>, Luettu 16.3.2012

Motiva http://www.motiva.fi/toimialueet/uusiutuva_energia/tuulivoima, Luettu 26.4.2012

Sener, PIENVOIMALOIDEN LIITTÄMINEN JAKELUVERKKOON 2001

SFS 6000 1. painos lokakuu 2007

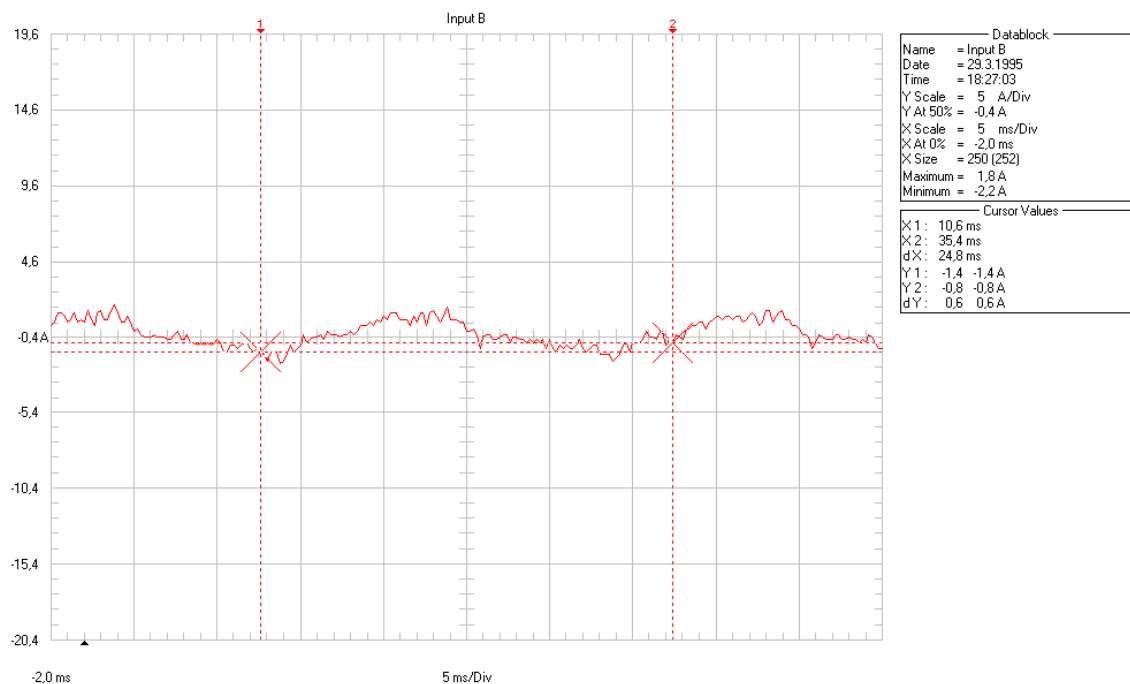
ABB TTT-käsikirja, sähkönlaatu

Leena korpinen <http://leenakorpinen.fi/archive/opukset/yliaalto-opus.pdf>, Luettu 2.4.2012

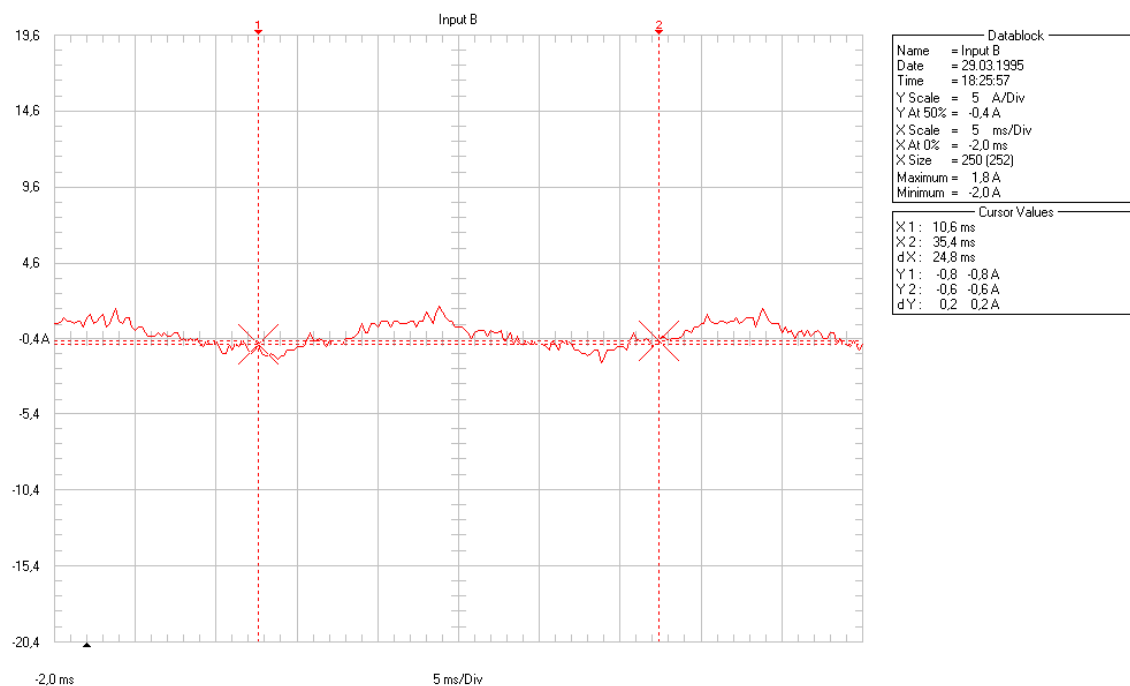
Lehto Ina, 2009. Mikrotuotannon liittäminen yleiseen sähkönjakeluverkkoon. Helsingin teknillinen korkeakoulu.

LIITTEET

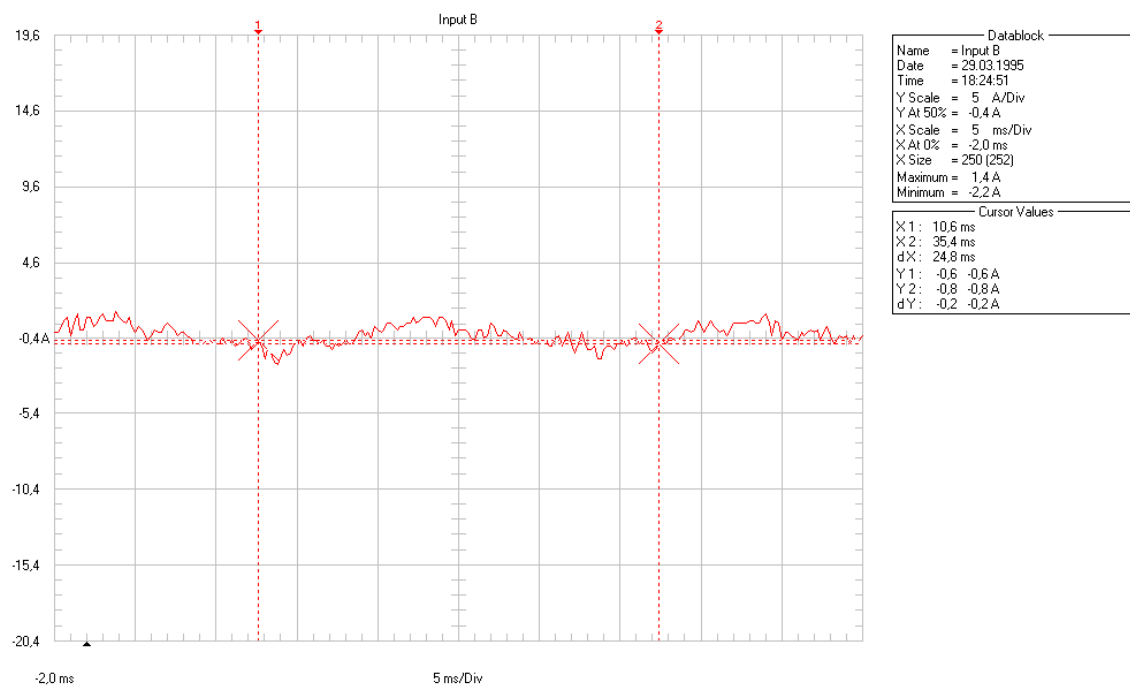
Liite 1. Sähkönlaatu mittauksen virta kuvaajat



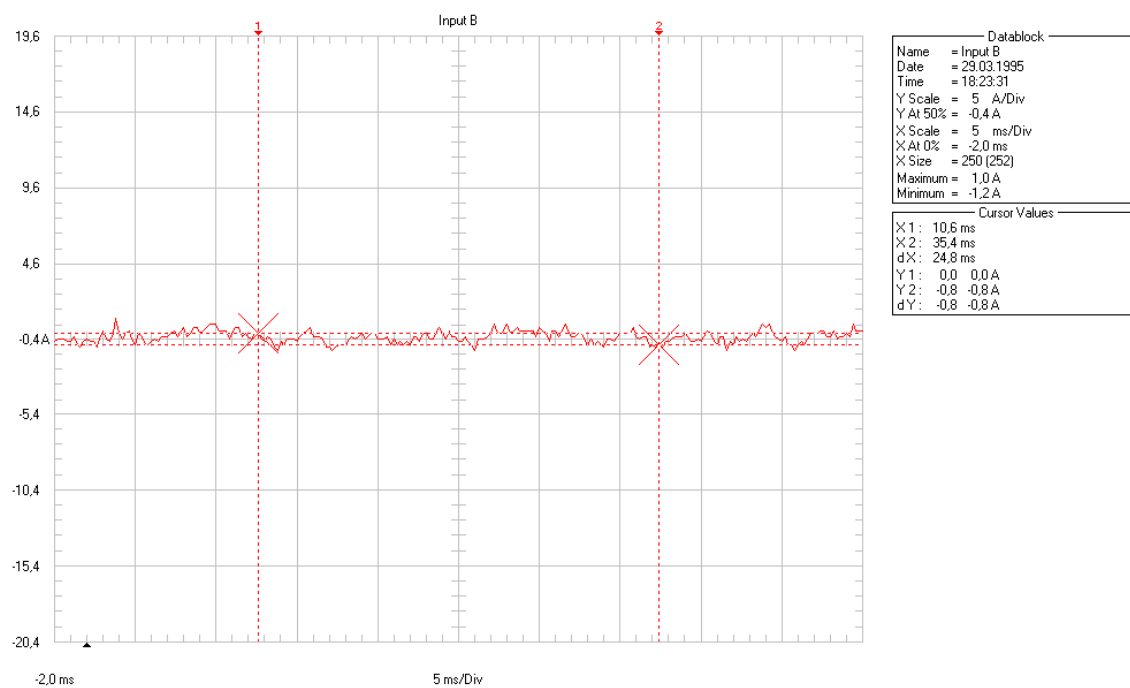
Generaattorin pyörimisnopeus 100 rpm



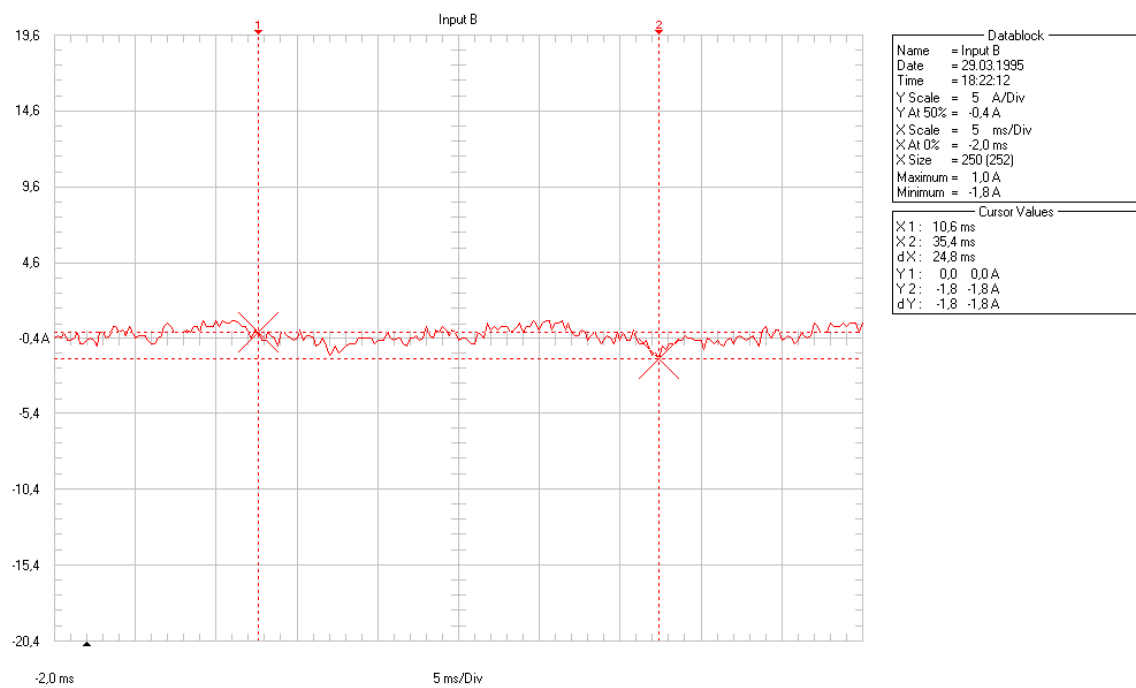
Generaattorin pyörimisnopeus 110 rpm



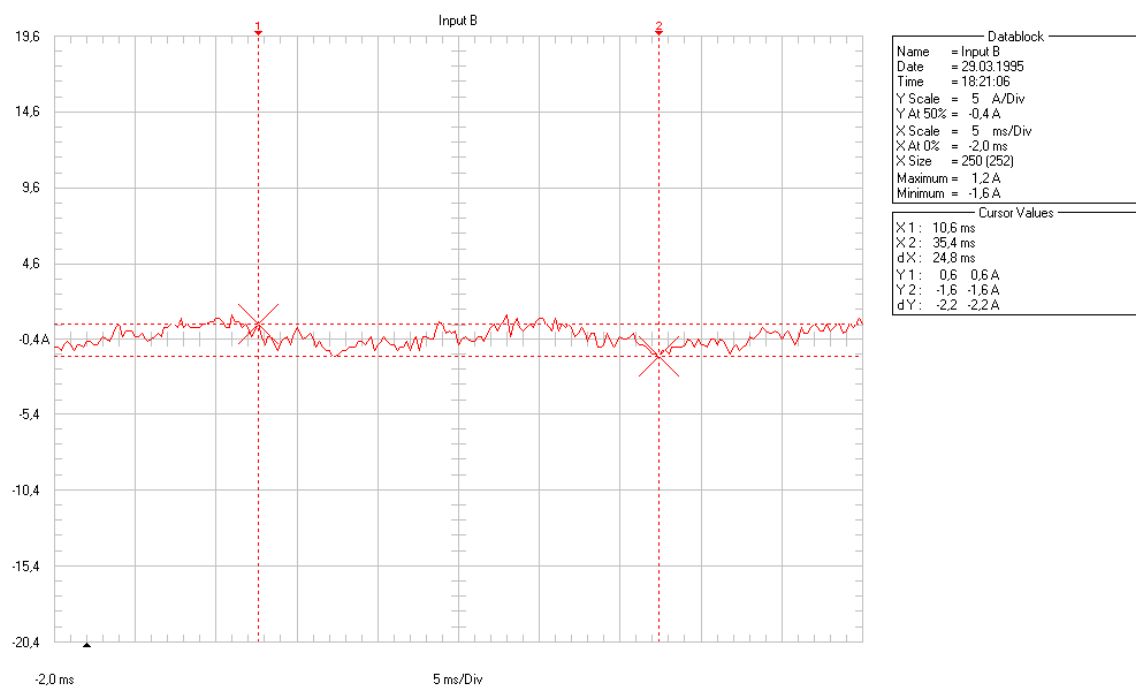
Generaattorin pyörimisnopeus 120 rpm



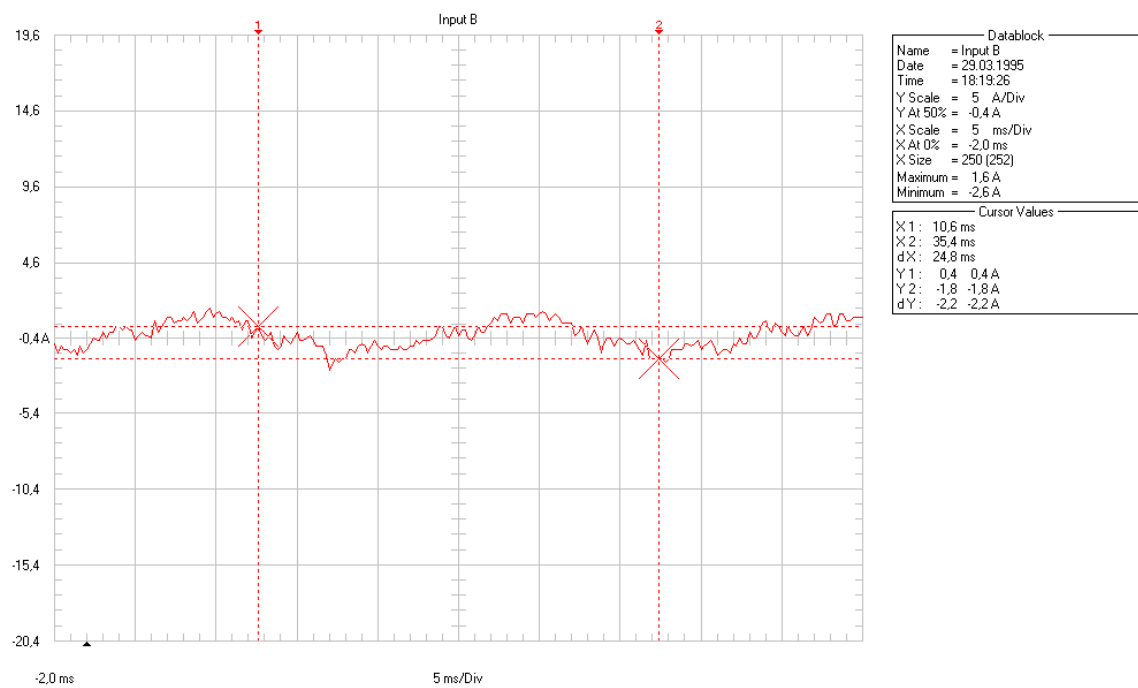
Generaattorin pyörimisnopeus 130 rpm



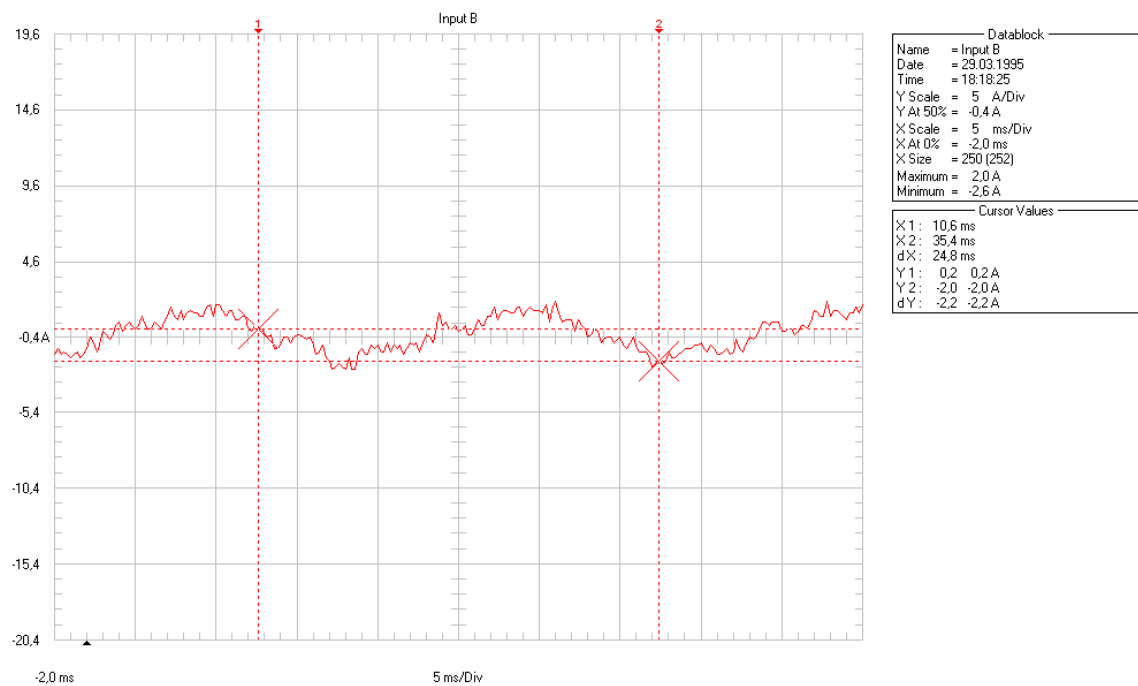
Generaattorin pyörimisnopeus 140 rpm



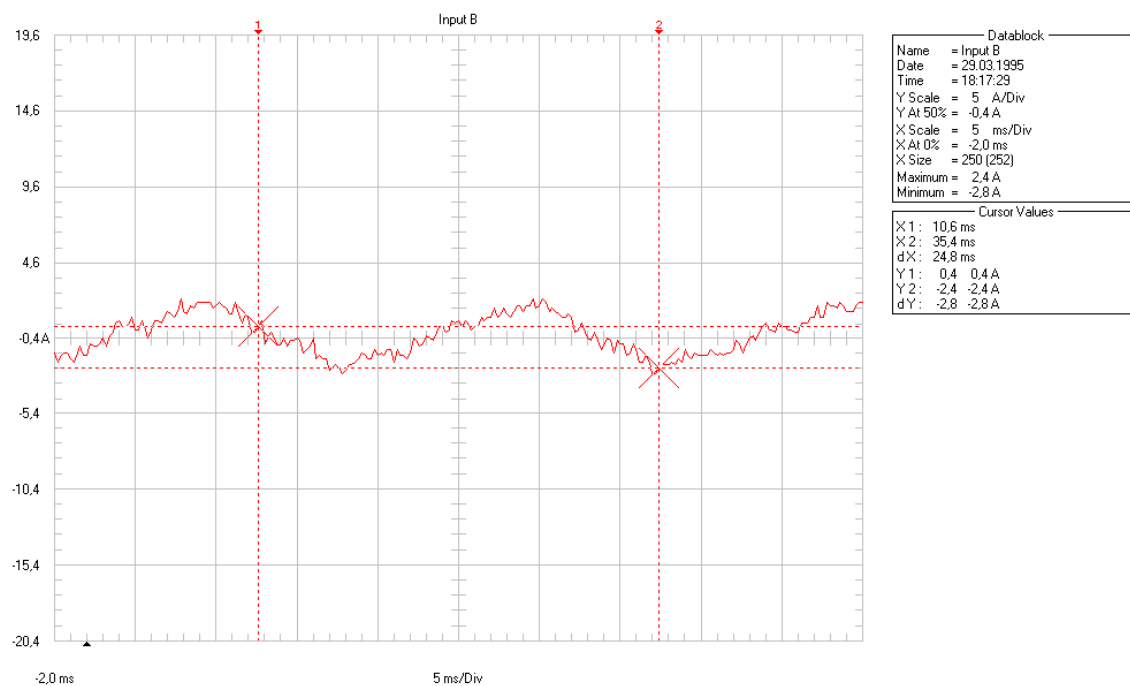
Generaattorin pyörimisnopeus 150 rpm



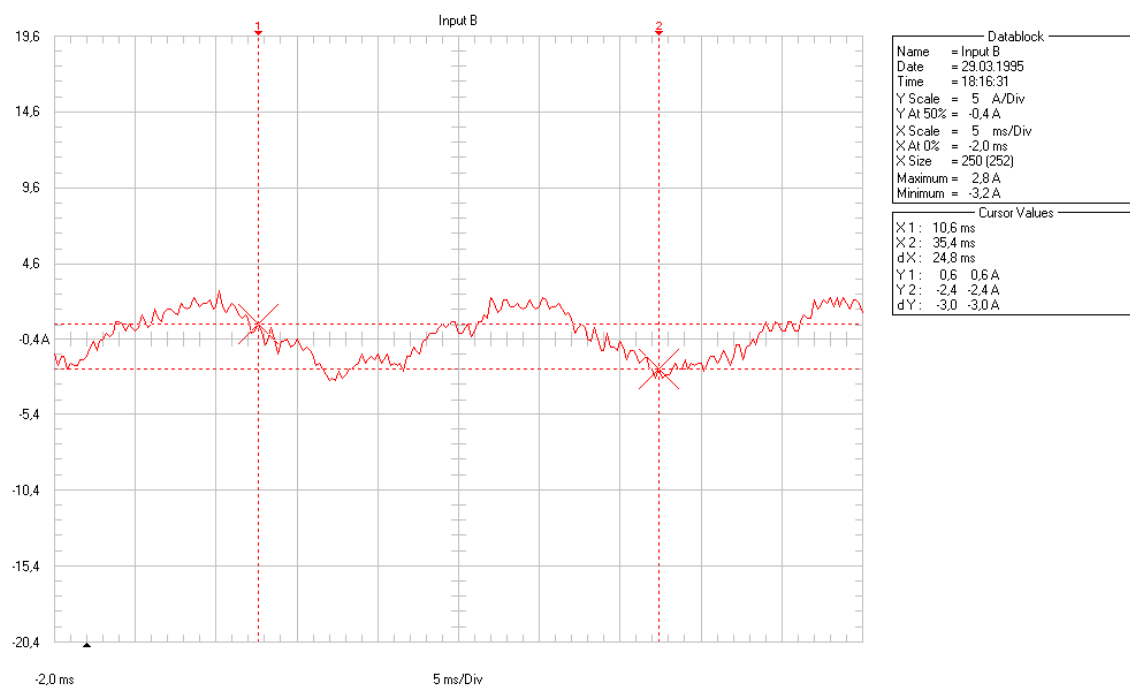
Generaattorin pyörimisnopeus 160 rpm



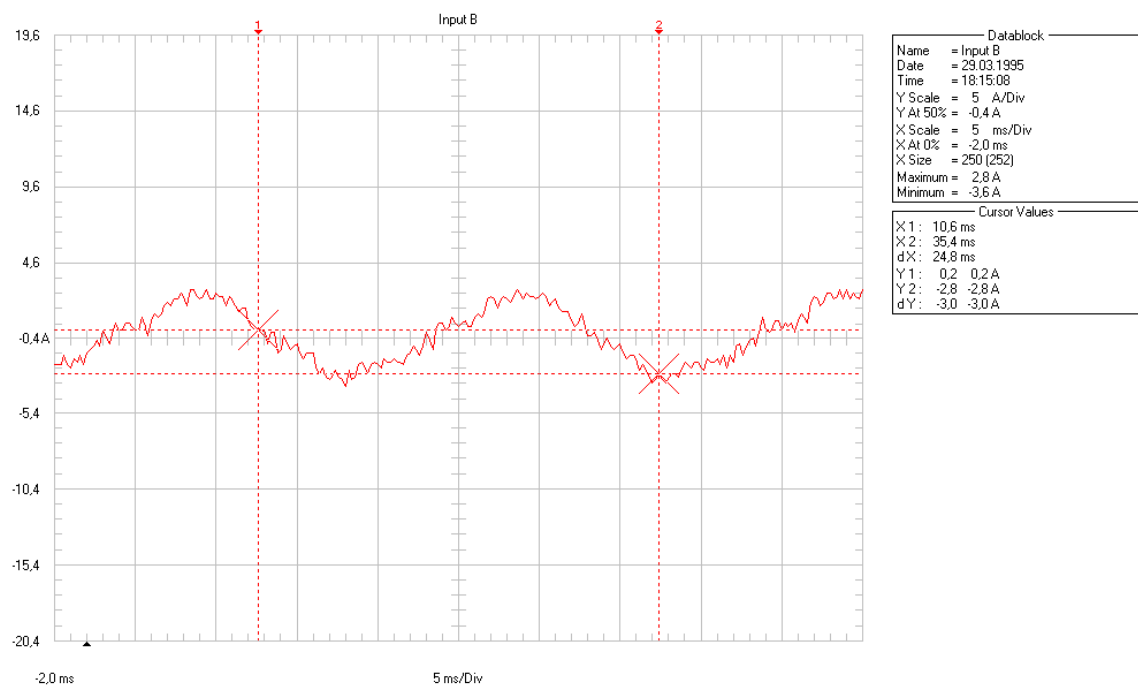
Generaattorin pyörimisnopeus 170 rpm



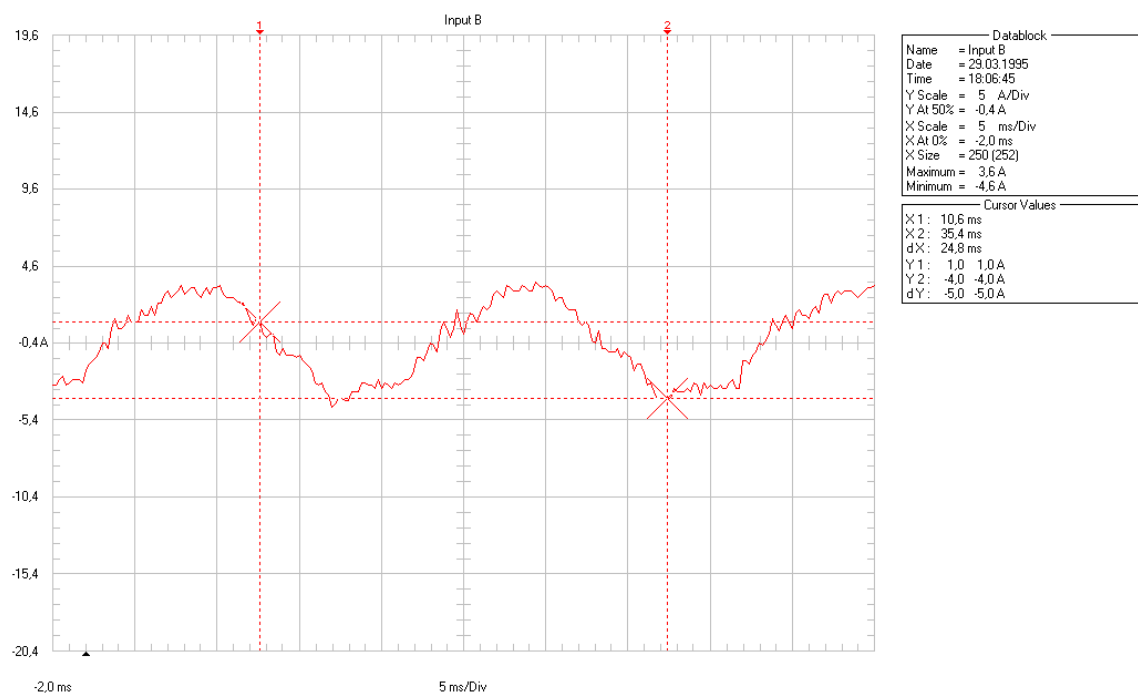
Generaattorin pyörimisnopeus 180 rpm



Generaattorin pyörimisnopeus 190 rpm

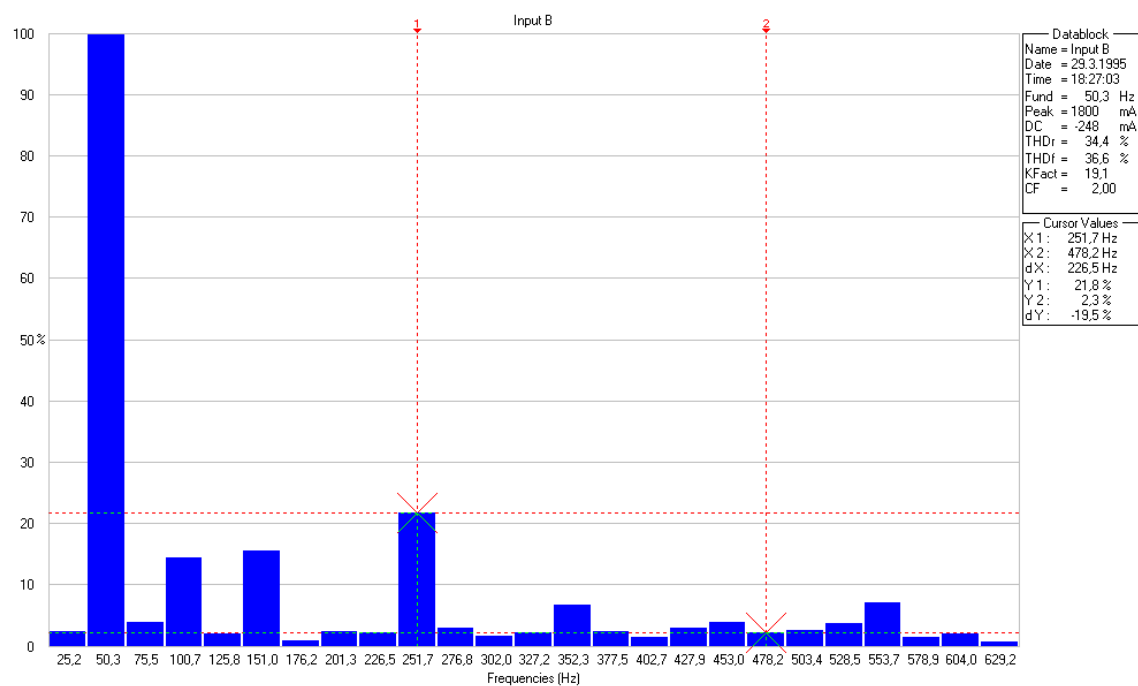


Generaattorin pyörimisnopeus 200 rpm

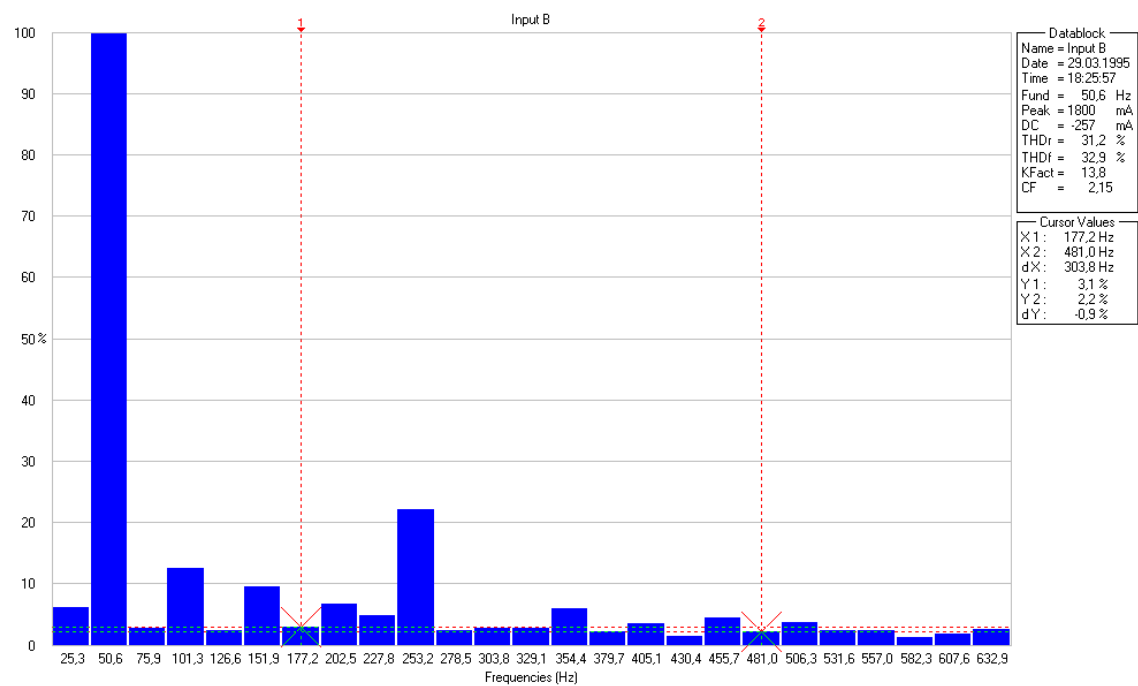


Generaattorin pyörimisnopeus 250 rpm

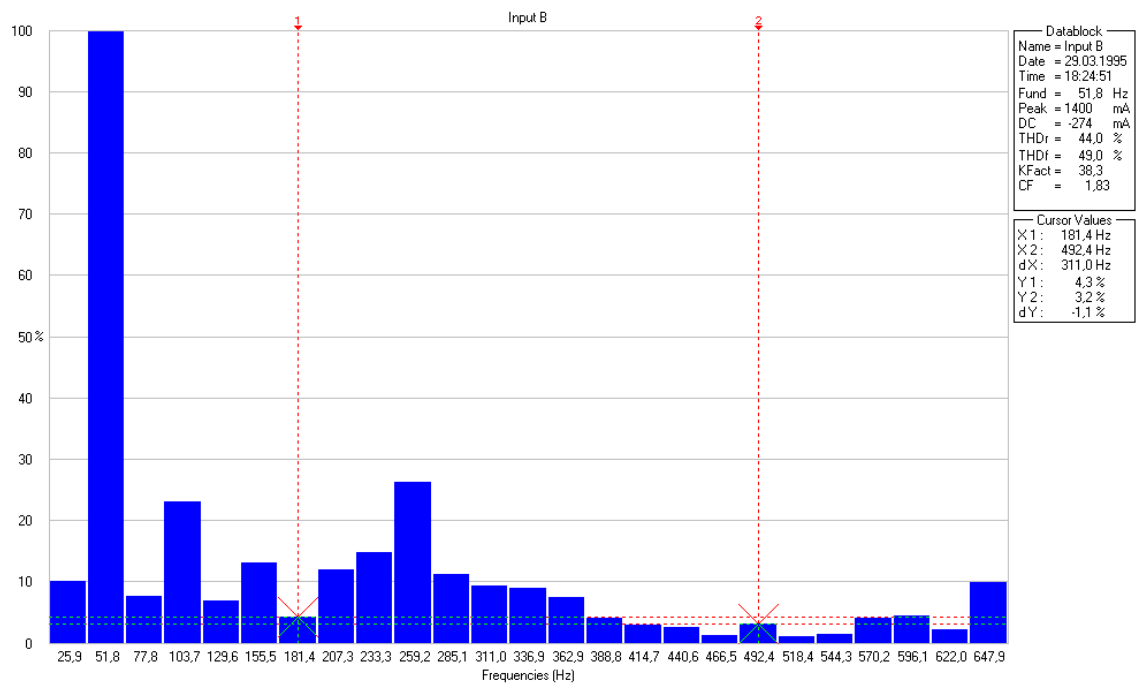
Liite 2. Sähkönlaatu mittauksen virran spektri kuvaajat



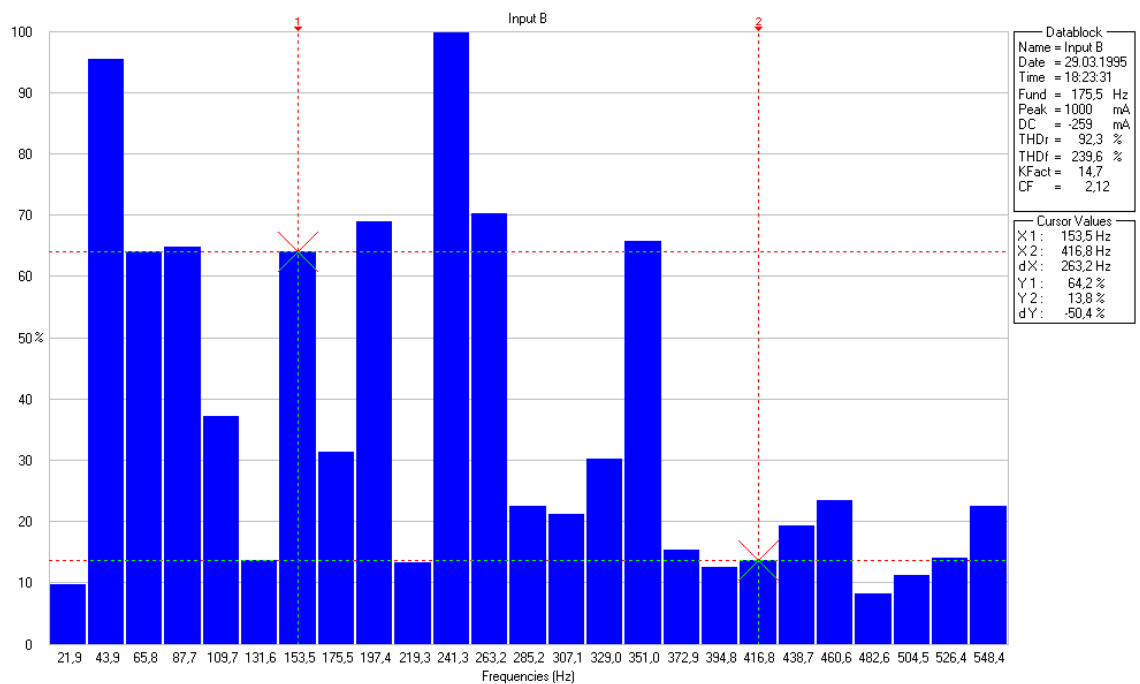
Generaattorin pyörimisnopeus 100 rpm



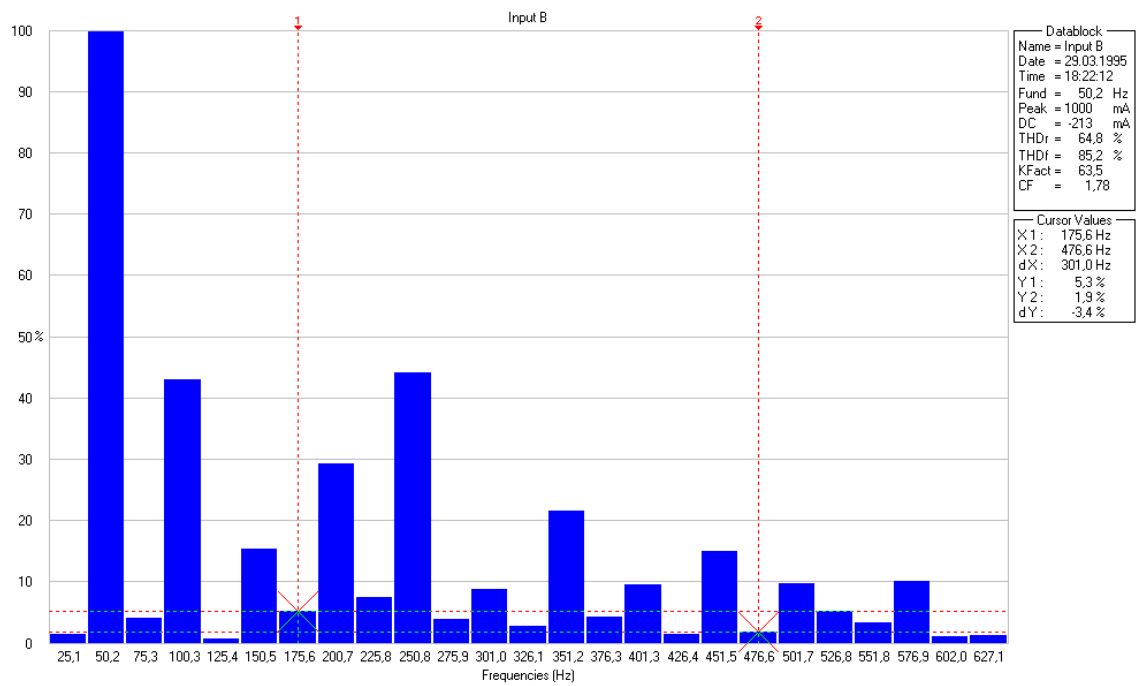
Generaattorin pyörimisnopeus 110 rpm



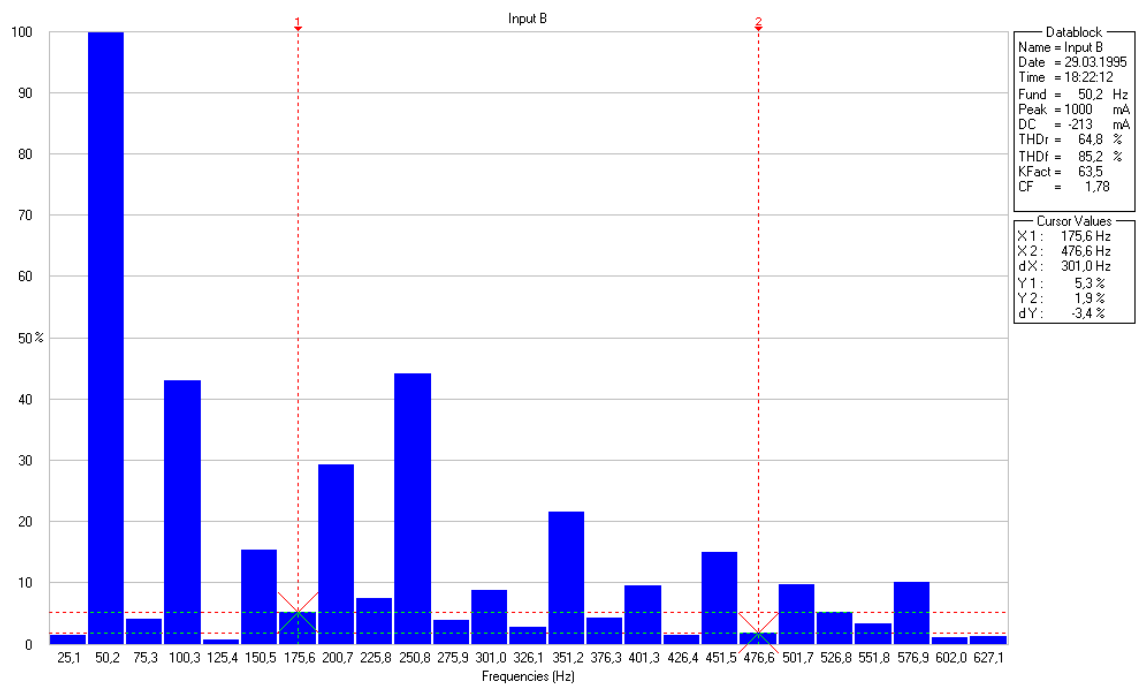
Generaattorin pyörimisnopeus 120 rpm



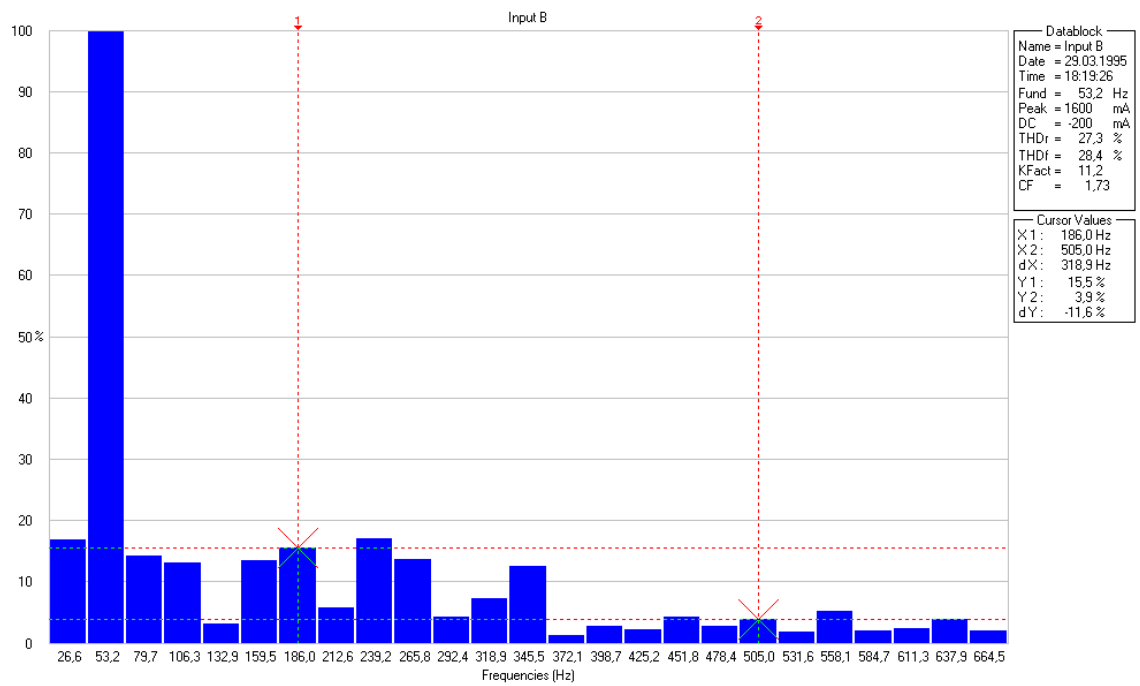
Generaattorin pyörimisnopeus 130 rpm



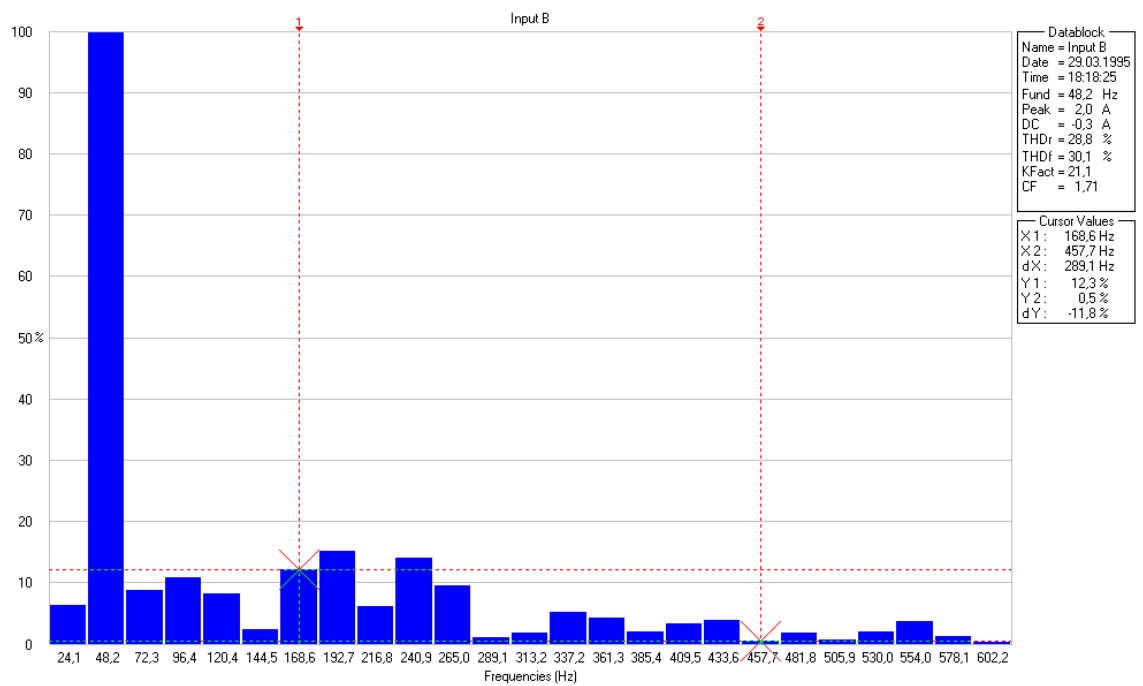
Generaattorin pyörimisnopeus 140 rpm



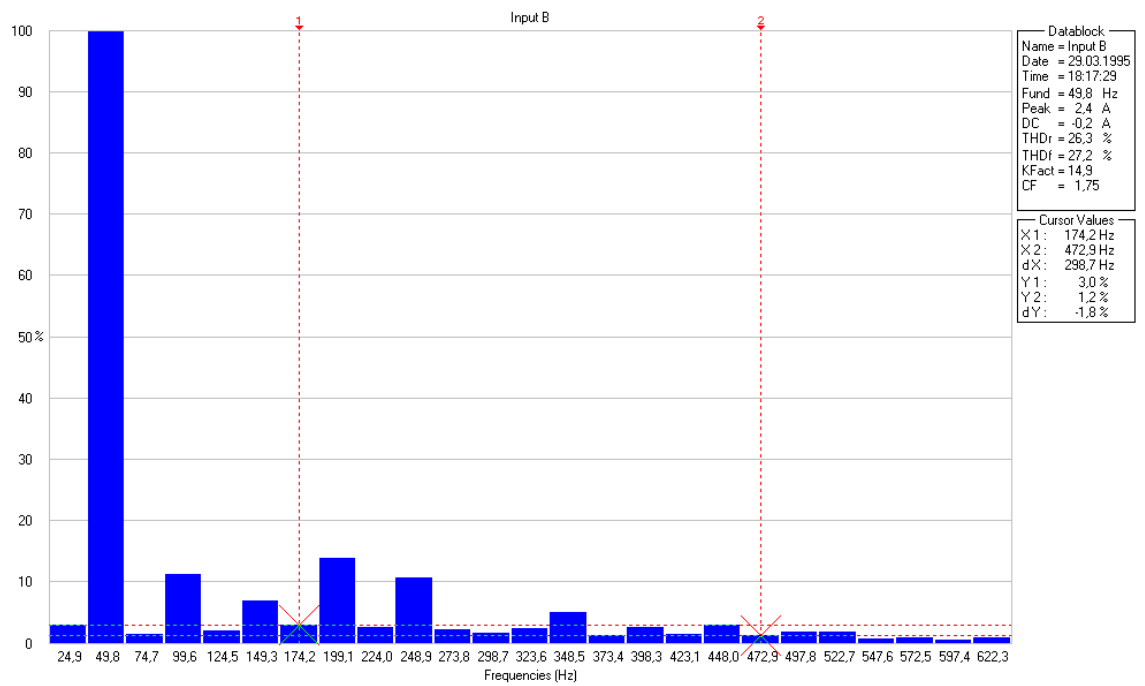
Generaattorin pyörimisnopeus 150 rpm



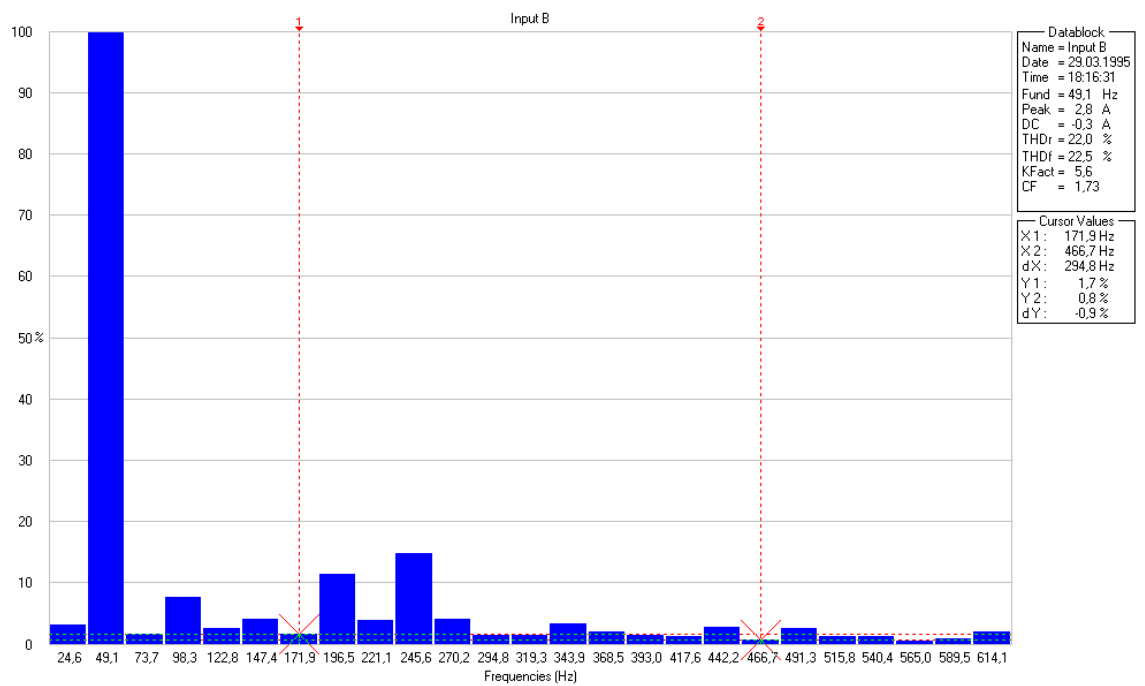
Generaattorin pyörimisnopeus 160 rpm



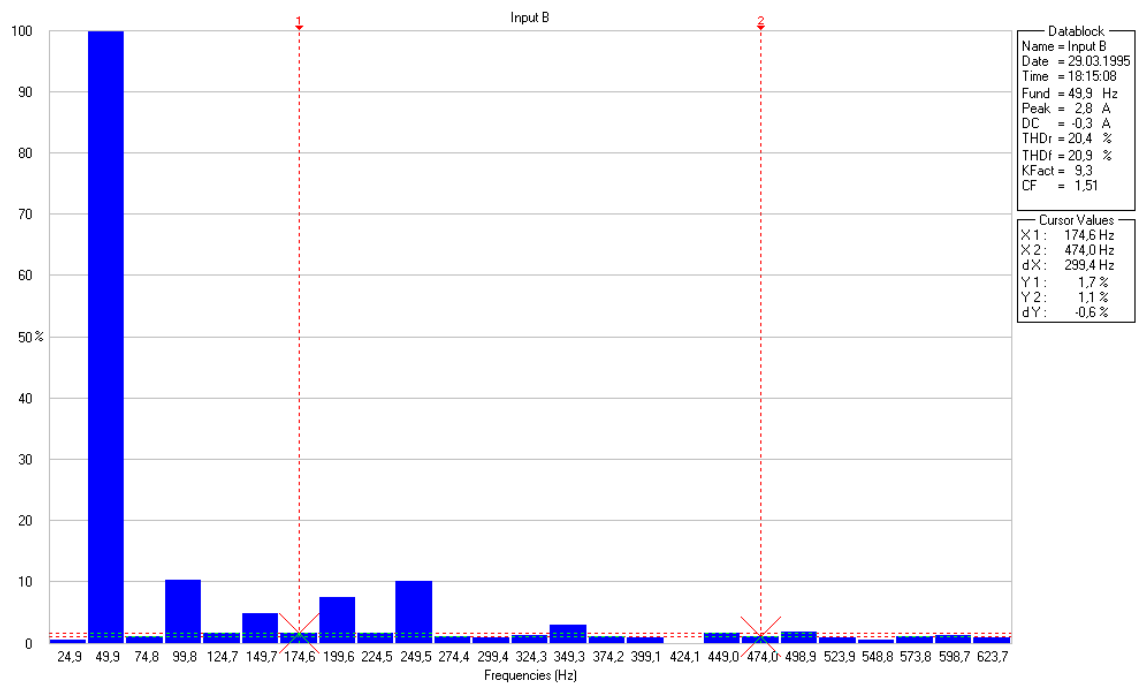
Generaattorin pyörimisnopeus 170 rpm



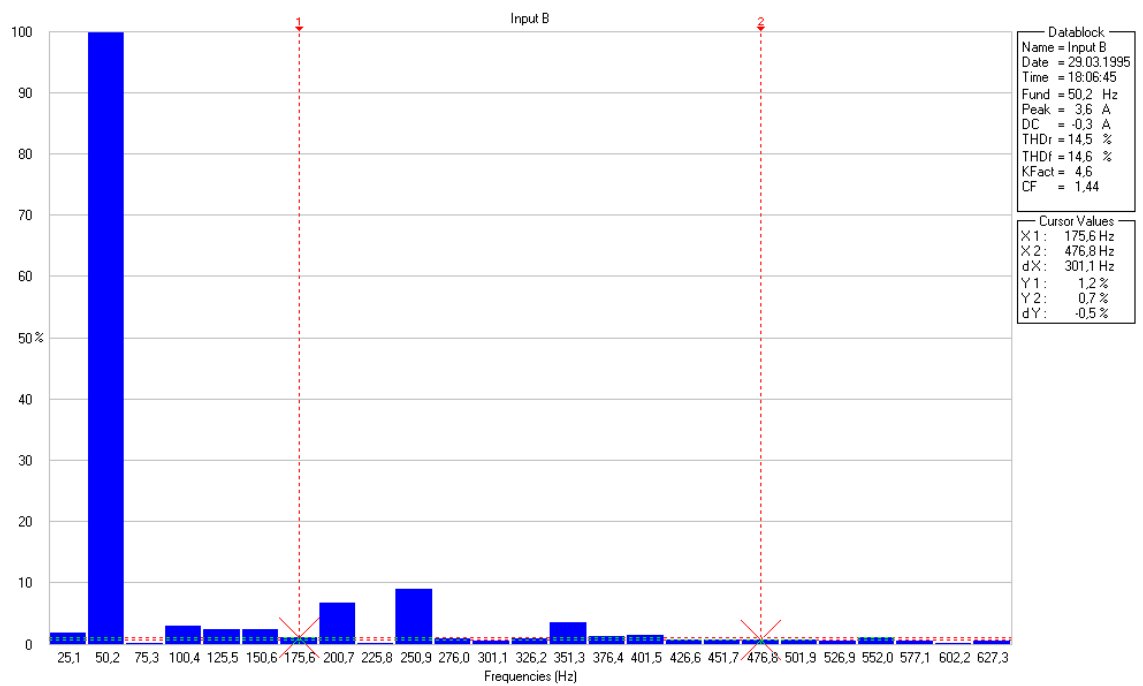
Generaattorin pyörimisnopeus 180 rpm



Generaattorin pyörimisnopeus 190 rpm

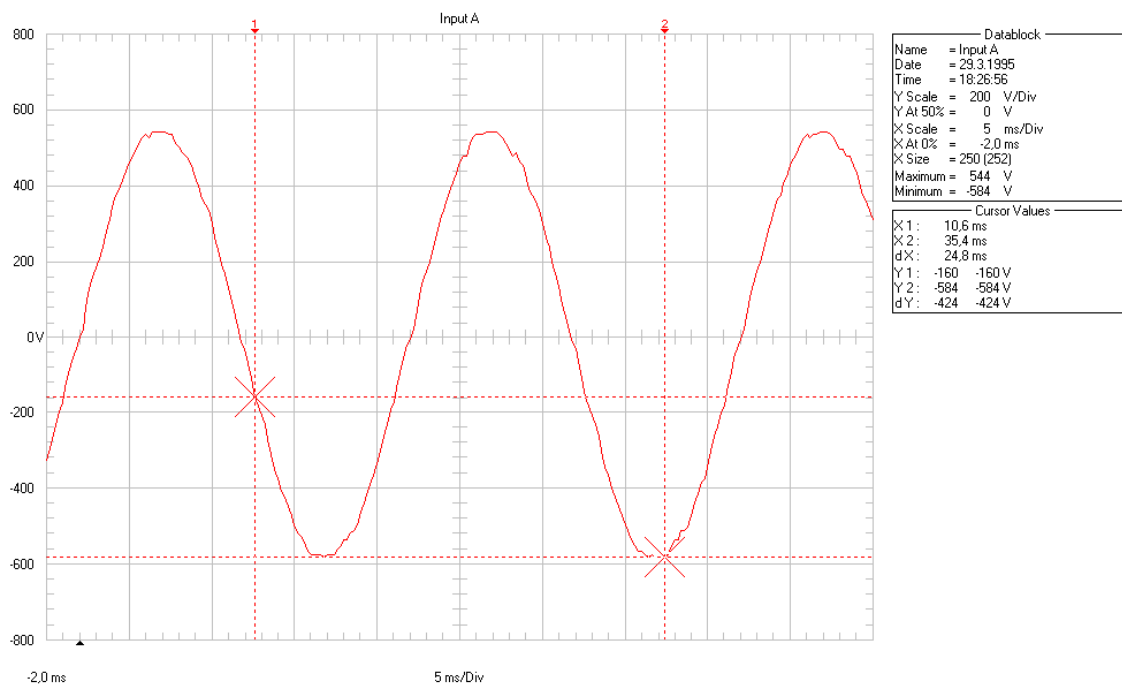


Generaattorin pyörimisnopeus 200 rpm

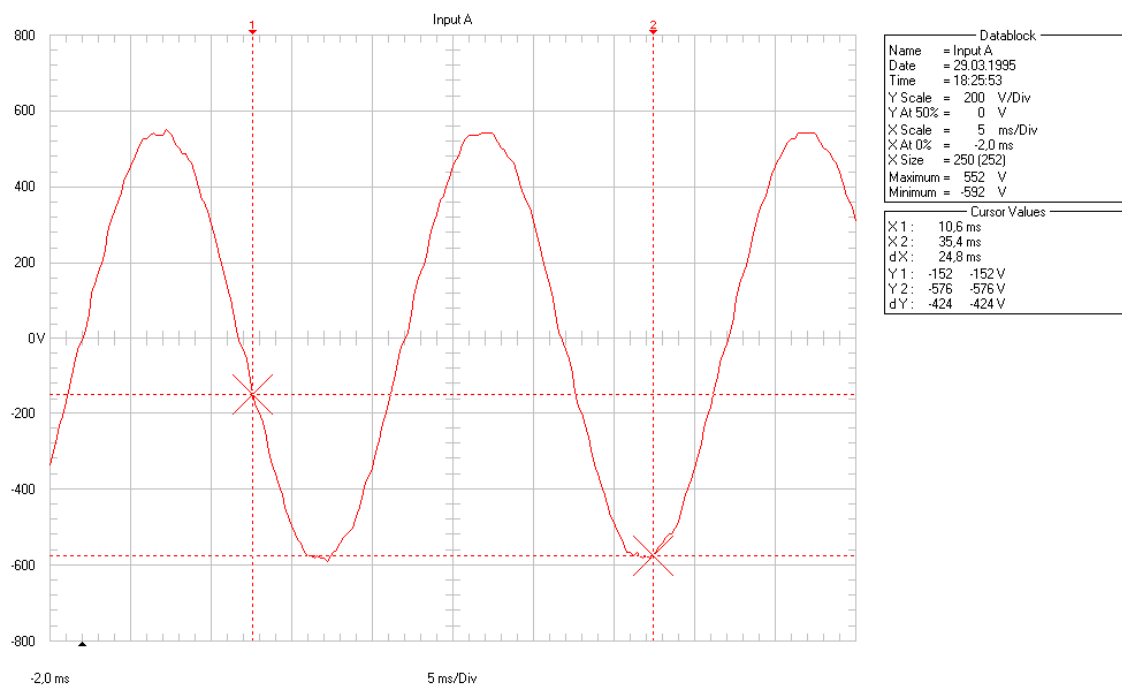


Generaattorin pyörimisnopeus 250 rpm

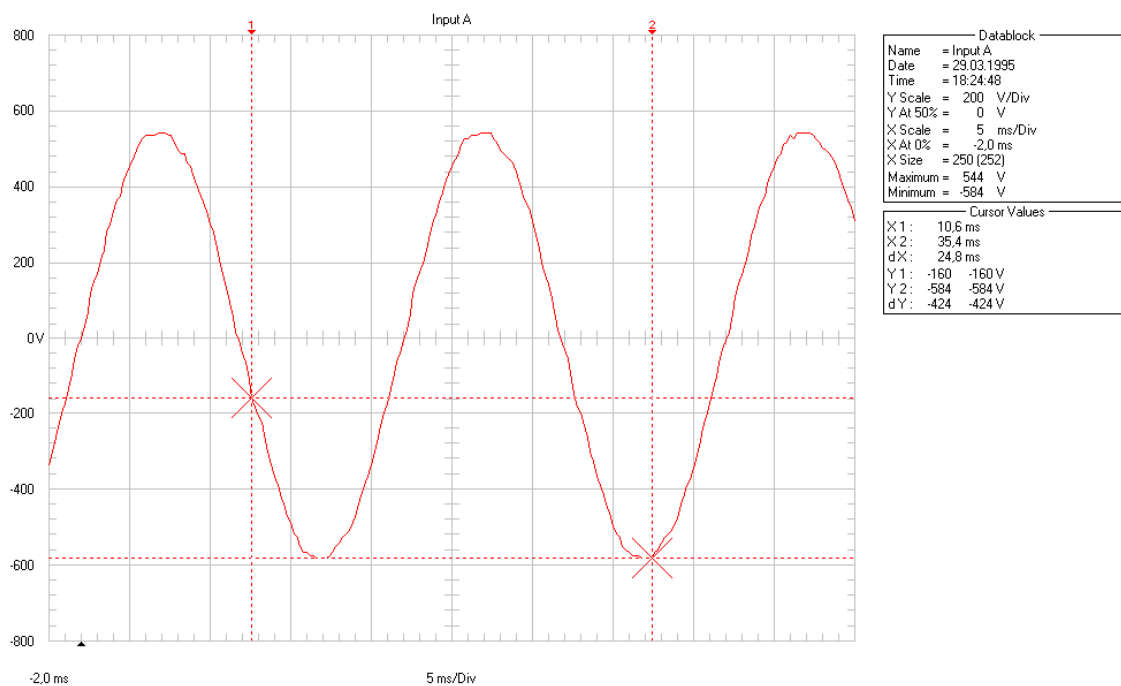
Liite 2. Sähkönlaatu mittauksen jännite kuvaajat.



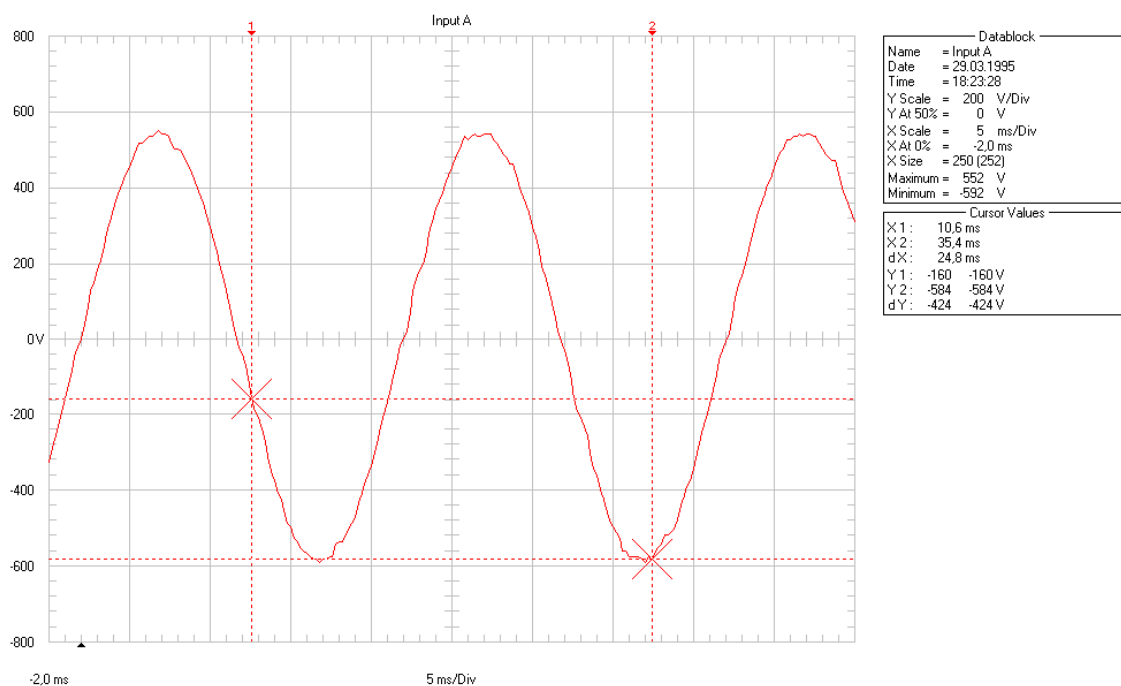
Generaattorin pyörimisnopeus 100 rpm



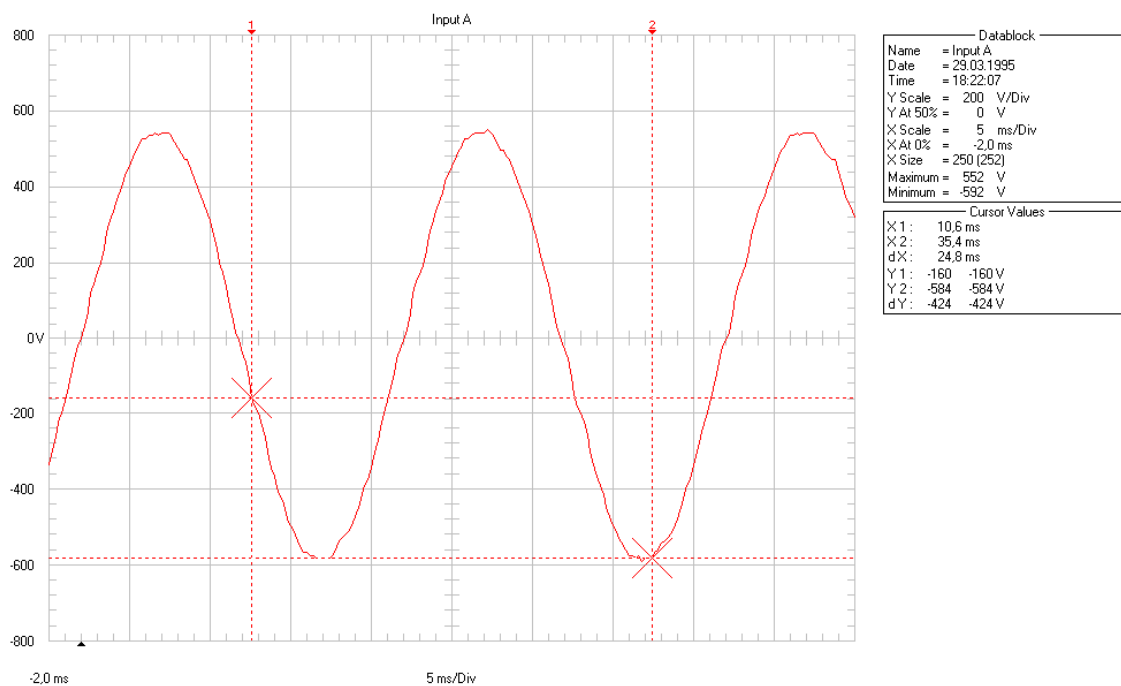
Generaattorin pyörimisnopeus 110 rpm



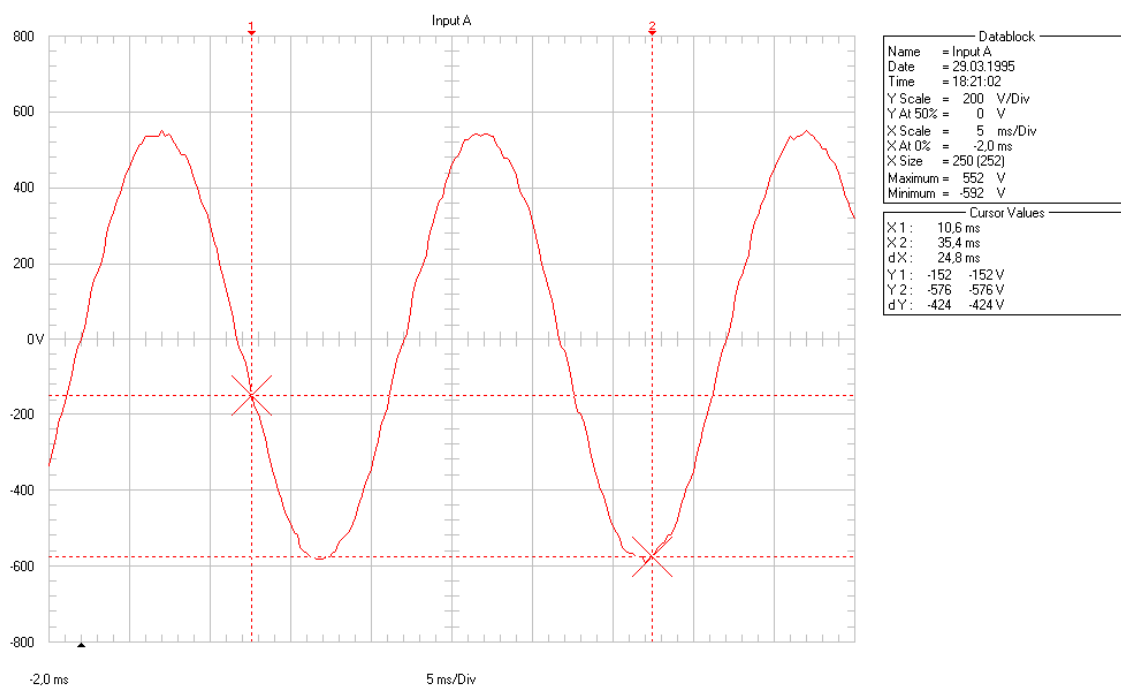
Generaattorin pyörimisnopeus 120 rpm



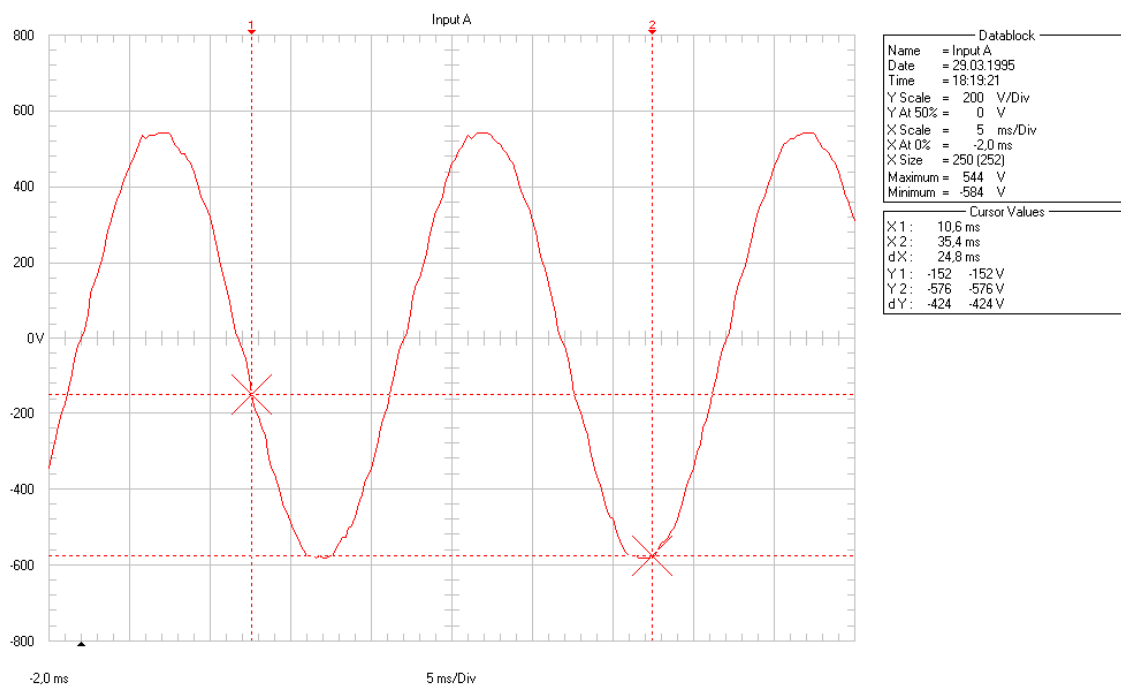
Generaattorin pyörimisnopeus 130 rpm



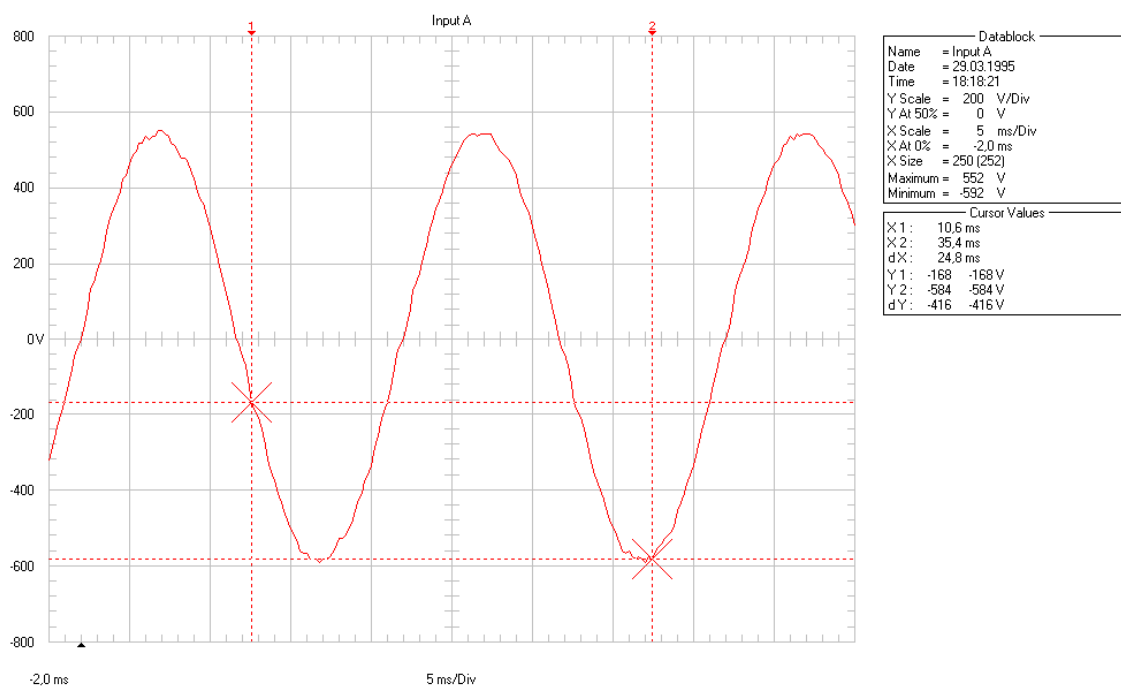
Generaattorin pyörimisnopeus 140 rpm



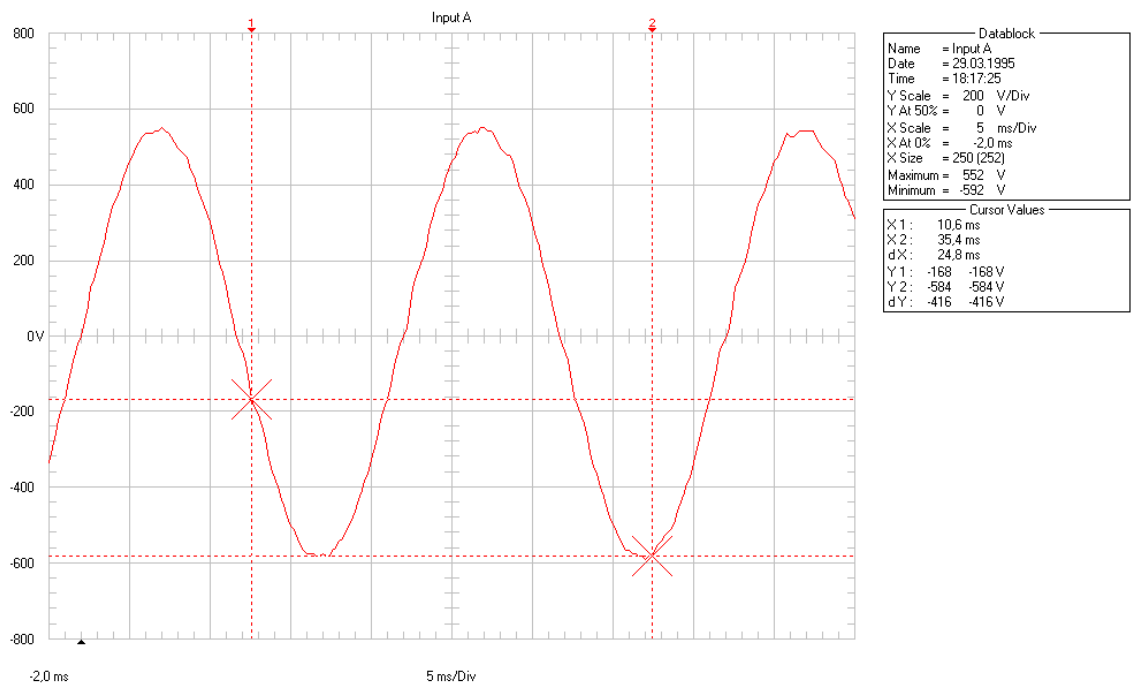
Generaattorin pyörimisnopeus 150 rpm



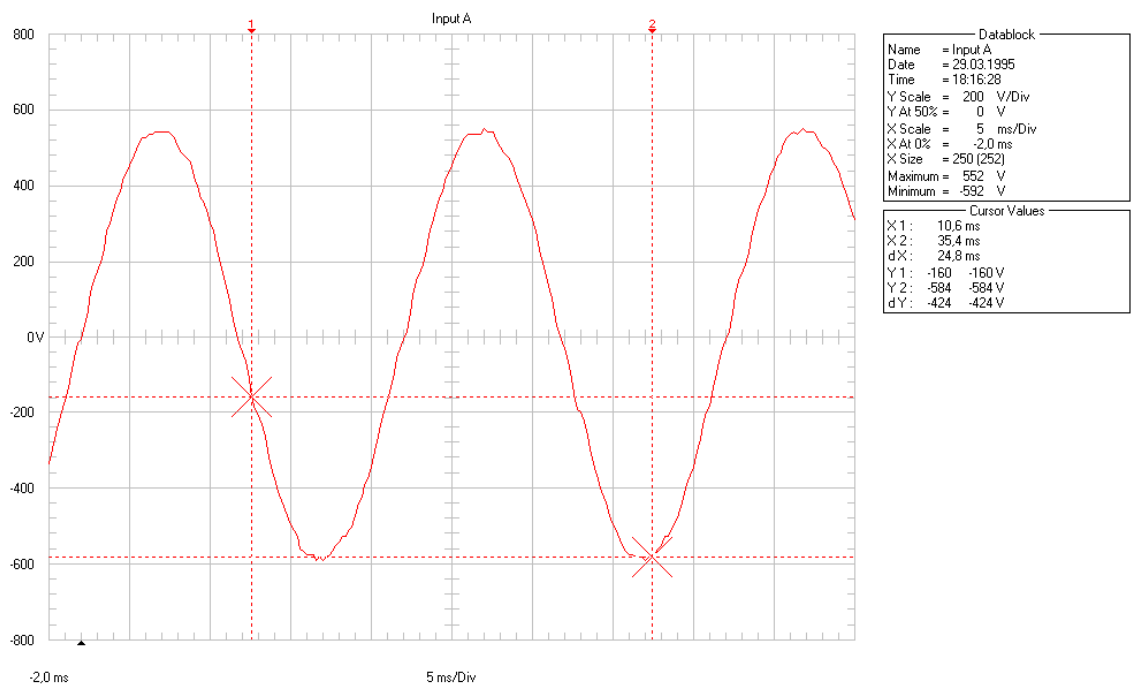
Generaattorin pyörimisnopeus 160 rpm



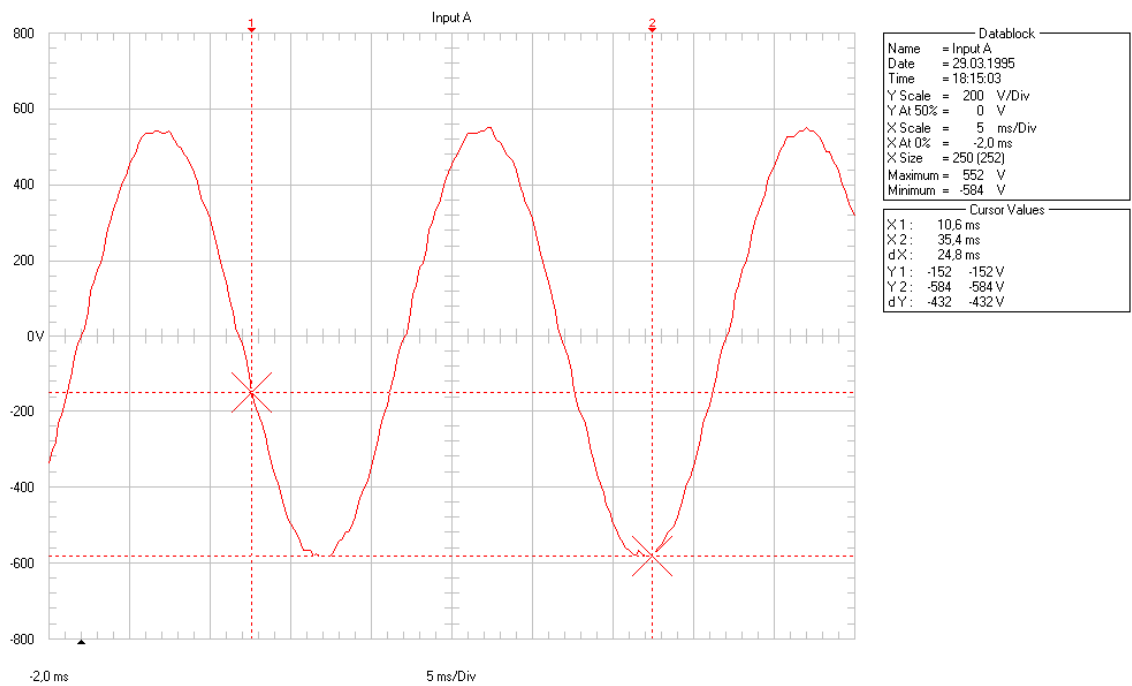
Generaattorin pyörimisnopeus 170 rpm



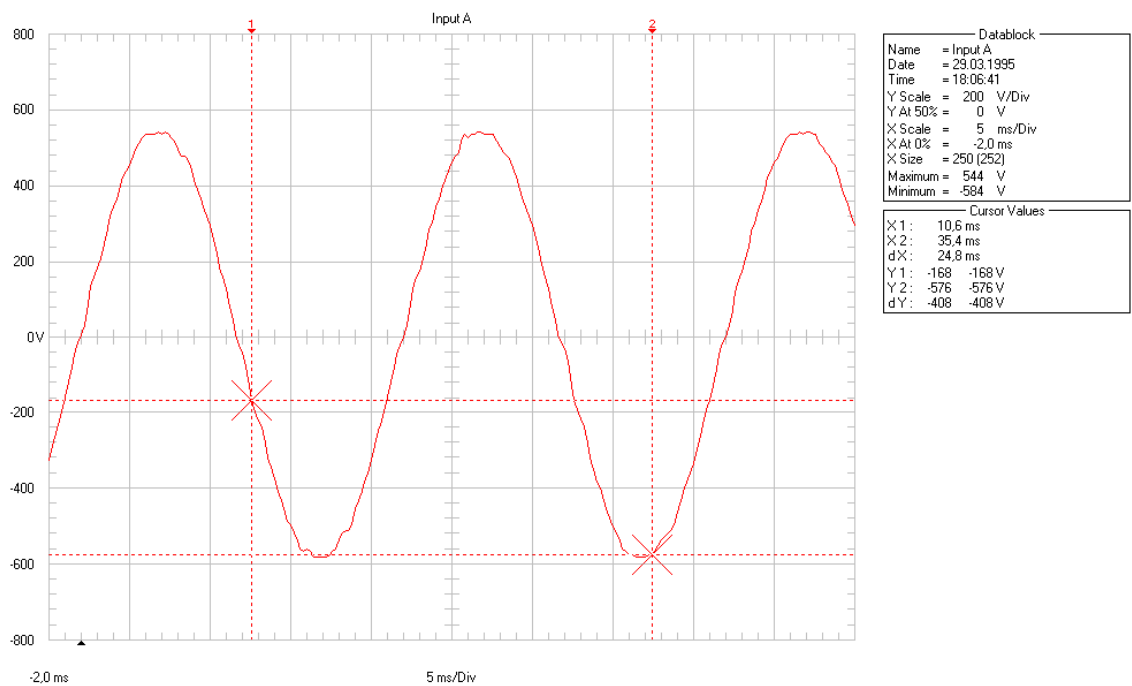
Generaattorin pyörimisnopeus 180 rpm



Generaattorin pyörimisnopeus 190 rpm

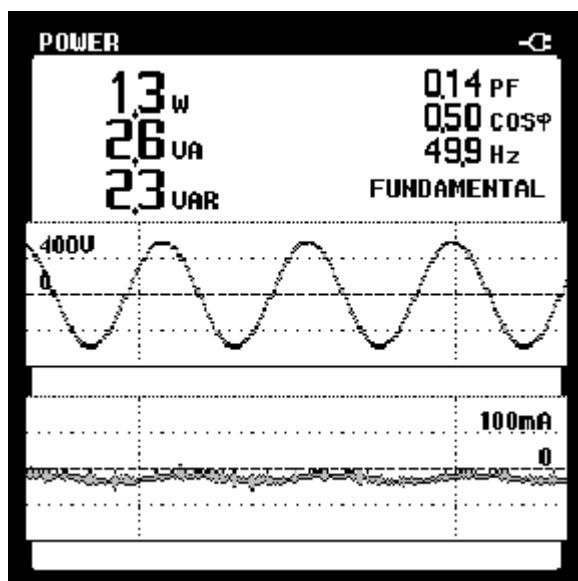


Generaattorin pyörimisnopeus 200 rpm

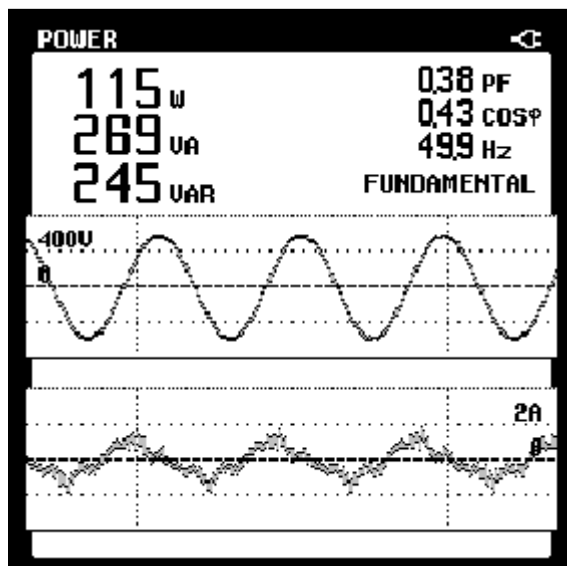


Generaattorin pyörimisnopeus 250 rpm

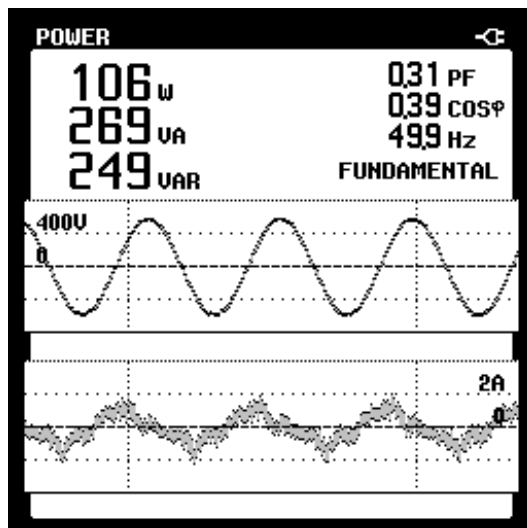
Liite 4. Suorituskyky mittauksen kuvaajat.



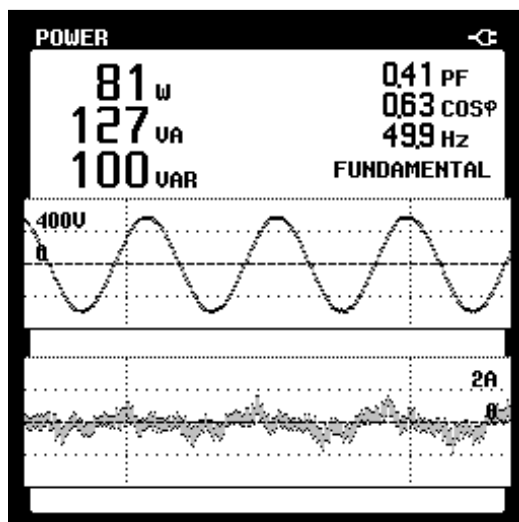
Laitteiston ottama yksivaihe teho horrostilassa.



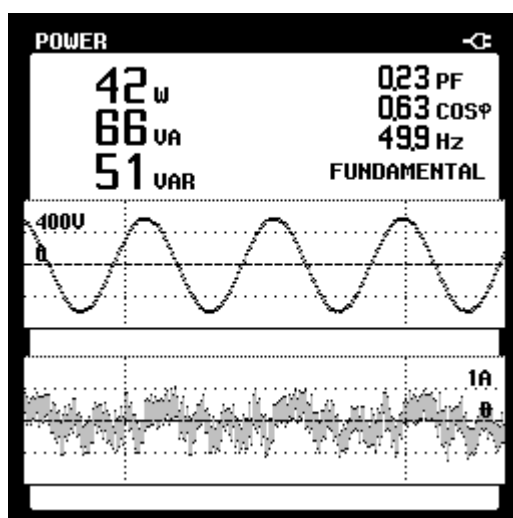
Laitteiston ottama yksivaihe teho valmiustilassa.



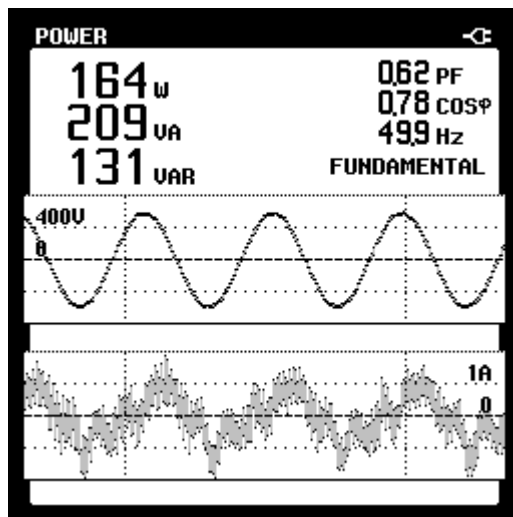
Laitteiston tuottama yksivaiheteho generaattorin pyörimisnopeudella 100 rpm



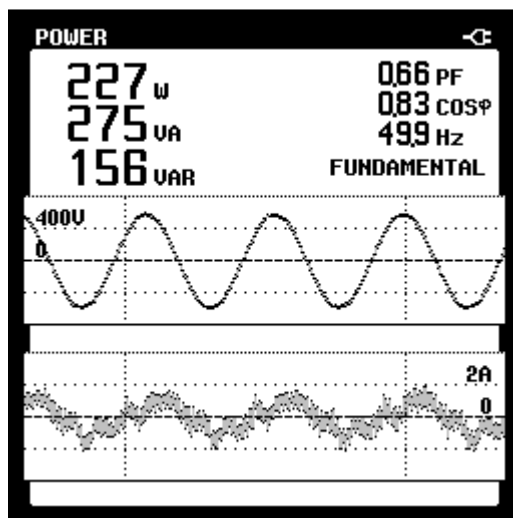
Laitteiston tuottama yksivaiheteho generaattorin pyörimisnopeudella 110 rpm



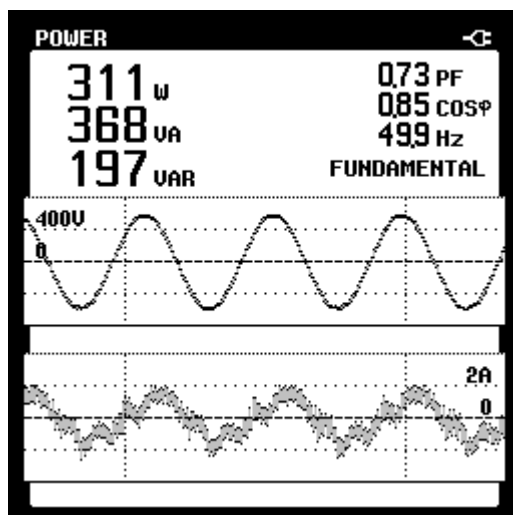
Laitteiston tuottama yksivaiheteho generaattorin pyörimisnopeudella 120 rpm



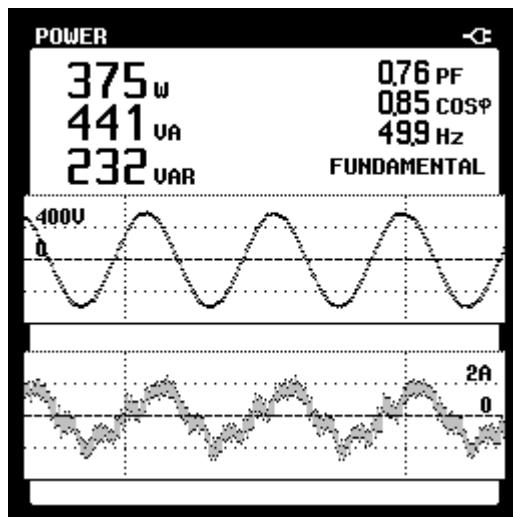
Laitteiston tuottama yksivaiheteho generaattorin pyörimisnopeudella 130 rpm



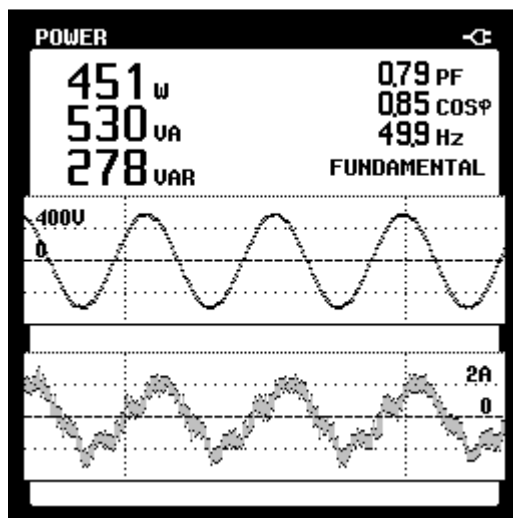
Laitteiston tuottama yksivaiheteho generaattorin pyörimisnopeudella 140 rpm



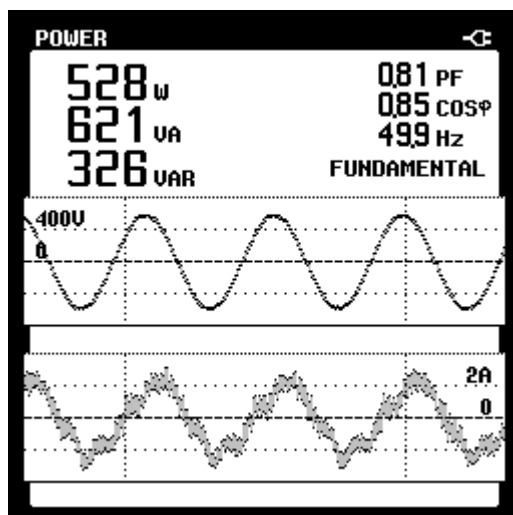
Laitteiston tuottama yksivaiheteho generaattorin pyörimisnopeudella 150 rpm



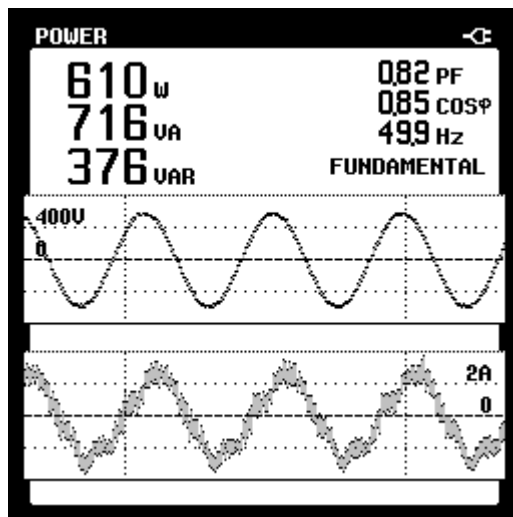
Laitteiston tuottama yksivaiheteho generaattorin pyörimisnopeudella 160 rpm



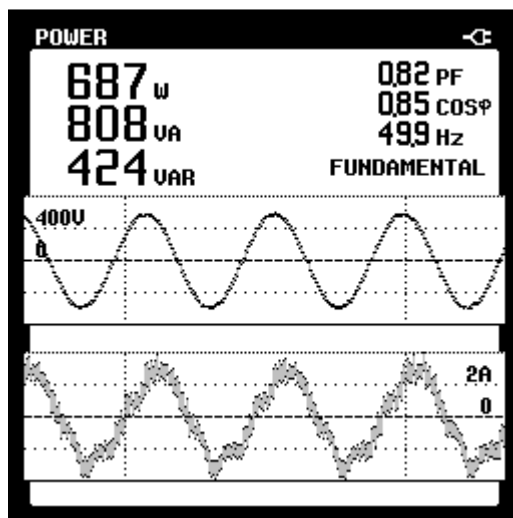
Laitteiston tuottama yksivaiheteho generaattorin pyörimisnopeudella 170 rpm



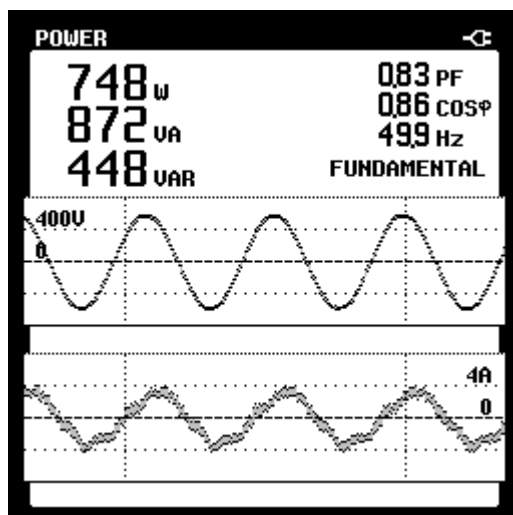
Laitteiston tuottama yksivaiheteho generaattorin pyörimisnopeudella 180 rpm



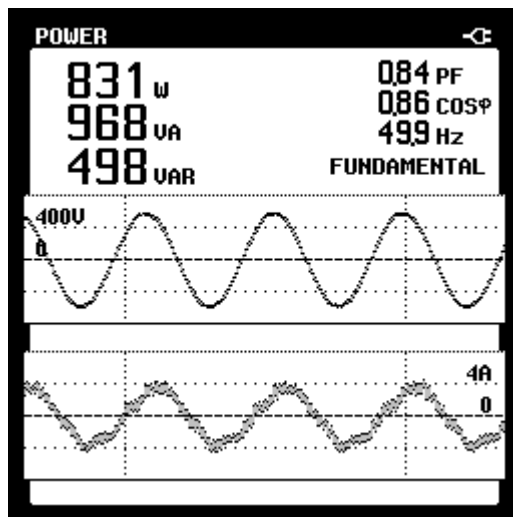
Laitteiston tuottama yksivaiheteho generaattorin pyörimisnopeudella 190 rpm



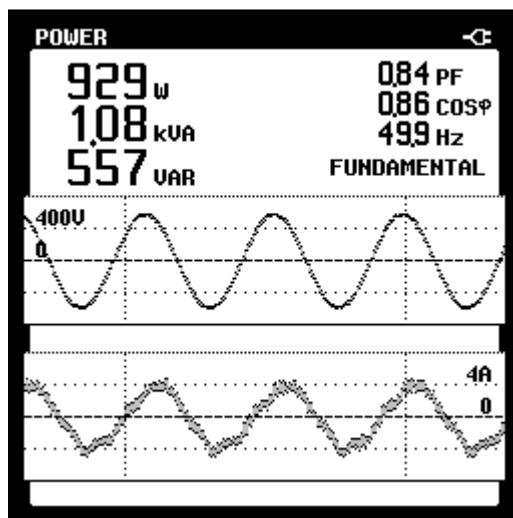
Laitteiston tuottama yksivaiheteho generaattorin pyörimisnopeudella 200 rpm



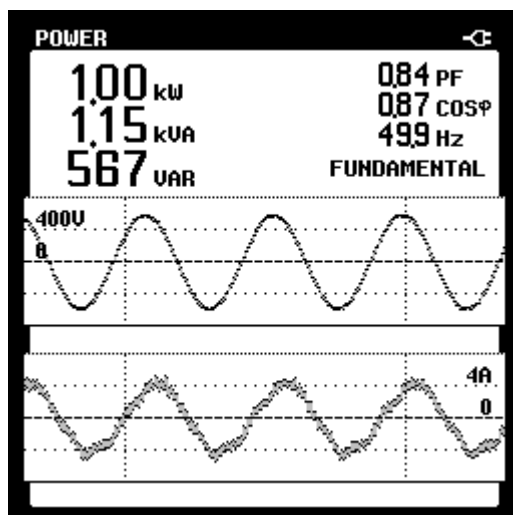
Laitteiston tuottama yksivaiheteho generaattorin pyörimisnopeudella 210 rpm



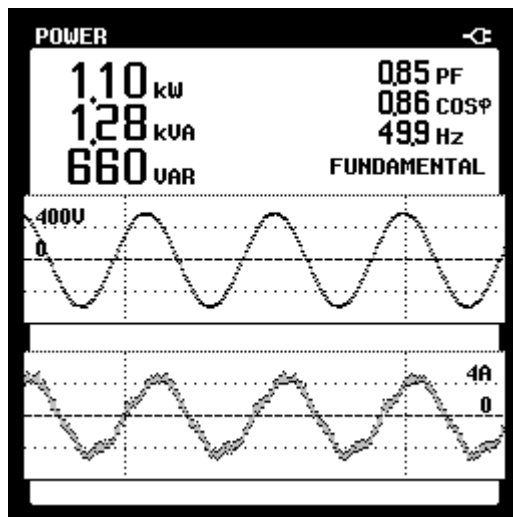
Laitteiston tuottama yksivaiheteho generaattorin pyörimisnopeudella 220 rpm



Laitteiston tuottama yksivaiheteho generaattorin pyörimisnopeudella 230 rpm



Laitteiston tuottama yksivaiheteho generaattorin pyörimisnopeudella 240 rpm



Laitteiston tuottama yksivaiheteho generaattorin pyörimisnopeudella 250 rpm